msr 2

messen · steuern · regeln

Prozeßrechner
R 4000 | K 1520 | K 1600

ursadat 5000

ursatrans 5000
Modem

ursatrans 5000
Modem

Modem
ursatrans 5000

schnelles serielles Interface

ursadat 5000
ursamar 5000
ursamar 4000

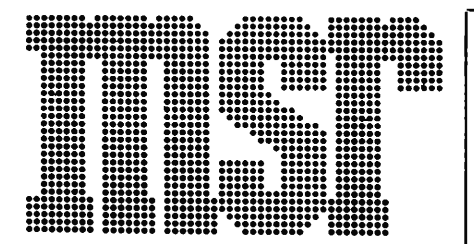
ursadat 5000
ursamar 4000 | ursalog 4000 / 5010

ursadat 5000
ursamar 5000
ursalog 5020
ursamar 5000
ursalog 5000
ursalog 5020
ursalog 5020

ursadat 5000
ursalog 5020
ursalog 4000
ursalog 5010

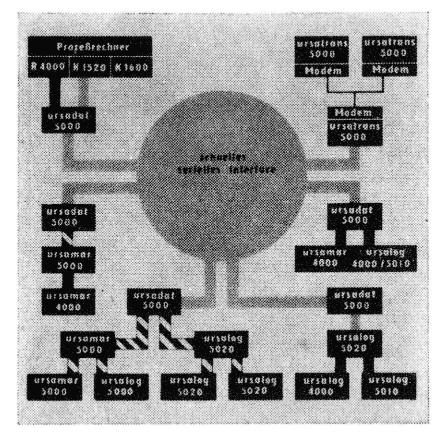


VEB
Verlag Technik
Berlin
Februar 1984
EVP: 4,-M



messen·steuern·regeln

Wissenschaftlich-technische
Zeitschrift für die
Automatisierungstechnik



Auch die Beiträge dieses Heftes sind Tagungsmaterialien des 17. Informationstechnischen Kolloquiums der TU Dresden. Wie im Heft 1/1984 stehen moderne Verfahren und Anlagenstrukturen der Automatisierungstechnik im Vordergrund. Unser Titelbild zeigt schematisch die Schnittstellenstruktur ursatron 5000.

Titelgrafik: *G. Schwesinger*

Herausgeber:

Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

2

27. Jahrgang
Februar 1984

VEB
VERLAG TECHNIK

AUFSÄTZE

ISSN 0026-0347

K.-P. Schulze, H.-J. Herrmann; H.-P. Sprenger[1])

Anwendungsmöglichkeiten adaptiver Verfahren bei der Automatisierung spezieller technologischer Prozesse bei der Glasseidenherstellung

0. Einleitung

Die Entwicklung der Geräte- und Anlagentechnik mit Mikrorechnern führt in fast allen Industriezweigen dazu, die teilweise noch in recht beträchtlichem Umfang vorhandene konventionelle Gerätetechnik in zunehmendem Maße durch programmierbare, moderne Hardware zu ersetzen. Dies ist verständlicherweise mit dem Ziel verbunden, neue leistungsfähigere Automatisierungsstrategien anzuwenden, um die größeren Möglichkeiten der modernen Gerätetechnik zur wirtschaftlichen Realisierung auch komplizierterer effektiver Regelalgorithmen besser als bisher nutzen zu können. Wie sich dies in einem speziellen Anwendungsfall in der Glasseidenindustrie darstellt, soll im folgenden näher untersucht werden.

1. Technologie der Glasseidenherstellung

Ohne auf nähere Details einzugehen, soll im folgenden der technologische Ablauf grob erläutert werden. Bei dem sogenannten Direkt- bzw. Einstufenverfahren, das hier nur betrachtet wird, werden Rohstoffe (z. B. Flußspat, Kaolin, Quarzsand, Borsäure) zu einem Gemenge vermischt und in einer Schmelzwanne (Bild 1) verschmolzen. Das flüssige Glas gelangt durch ein beheiztes Kanalsystem (Speiser) zu den einzelnen Spinnstellen in Form von Düsenwannen, die sich in größerer Anzahl am Boden eines jeden Speiserkanals befinden. Durch den Düsenboden der Wannen treten die einzelnen Elementarfäden aus, werden beschlichtet, je nach Produktionssortiment zu einem oder mehreren Fadenbündeln zusammengefaßt, mit Hilfe eines Aufwickelaggregates abgezogen und zu einer Spinnspule gewickelt. Der so hergestellte Glasseidenspinnfaden ist das Ausgangsprodukt für die Weiterverarbeitung und wird entsprechend dem Sortiment z. B. zu Roving, Twist, Zwirn oder Gewebe verarbeitet.

Besondere Bedeutung für die Qualität und Quantität bei der Erzeugung der Glasseidenprodukte kommt der Spinnfadenherstellung zu. Nur durch eine hohe Stabilität und exakte Prozeßführung kann die Produktion gesichert bzw. erhöht werden. Dies durch eine zweckmäßig gewählte Struktur der Automatisierungseinrichtung sowie eine auf den speziellen Fall zugeschnittene Steuerungsstrategie zu erreichen, ist das Ziel der durchgeführten Untersuchungen. Dabei ist es sowohl aufgrund des Umfanges der für eine gesamte Schmelzwanneneinheit zu erfüllenden Aufgabenstellung für die Automatisierung als auch aufgrund des gegenwärtig erreichten Entwicklungsstandes zweckmäßig, zunächst mit der detaillierten Ausarbeitung einer Automatisierungslösung für einen bestimmten Teilprozeß zu beginnen. Unter Berücksichtigung des großen Einflusses, den die Vorgänge

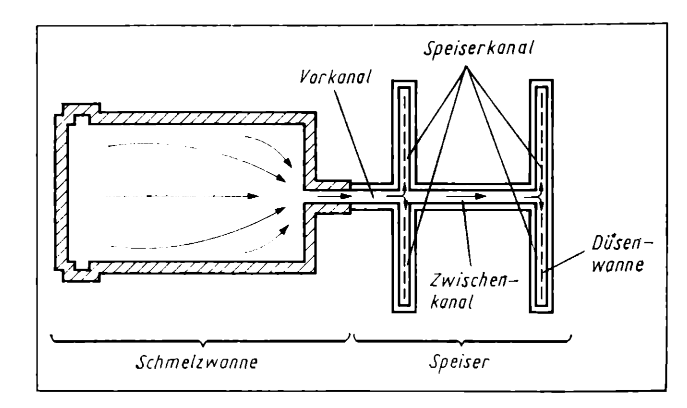


Bild 1. Grobschema einer Anlage zur Glasseidenherstellung

im Speiser auf die Qualität des Glasseidenspinnfadens haben, ist es sinnvoll, mit den Untersuchungen an diesem Teil der Produktionsanlage zu beginnen.

2. Speiser

Das H-förmige Speisersystem (Bild 1) besteht aus einem Vor- und Zwischenkanal sowie vier Speiserkanälen, an deren Boden, wie bereits erwähnt wurde, sich die Spinnstellen befinden. Zur Gewährleistung einer hohen Spinnsicherheit sowie einer gleichbleibenden Qualität ist es u. a. erforderlich, das Glas an den jeweiligen Düsenwannen kontinuierlich und mit einer bestimmten, konstant zu haltenden Temperatur bereitzustellen. Um dies realisieren zu können, sind im allgemeinen am Speisersystem relativ viele einschleifige Kreise zur Regelung des Glasbadniveaus, des Heizgas-Luft-Verhältnisses, der Gas-Luft-Durchsätze, der Gewölbetemperaturen und der Düsenbodentemperaturen installiert.

Für die meisten der bisher bekannt gewordenen industriellen Anlagen kann der Entwicklungsstand wie folgt stark vereinfacht eingeschätzt werden:

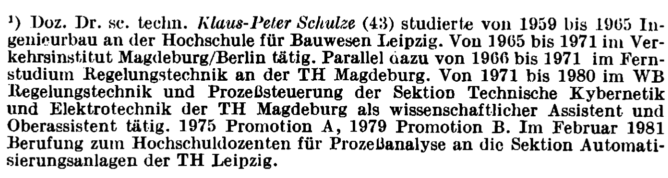
- unzureichende Kenntnisse über das Prozeßverhalten
- Regelung der wichtigsten Prozeßgrößen durch eine relativ große Anzahl einschleifiger, völlig unabhängig voneinander nach empirischen Regeln dimensionierter Regelkreise
- Realisierung mit konventioneller Gerätetechnik.

Daß infolge dieser Situation noch erhebliche Reserven sowohl hinsichtlich einer gleichbleibenden hohen Qualität des Glasseidenspinnfadens als auch der Steigerung der Produktion vorhanden sind, dürfte verständlich sein. Zur weiteren Erschließung dieser Reserven wird in vielen Fällen die folgende Vorgehensweise zweckmäßig sein:

- Erweiterung der bereits vorhandenen Prozeßkenntnisse durch gezielte prozeßanalytische Untersuchungen vorwiegend experimenteller Art
- Ermittlung eines geeigneten Regelalgorithmus, der auch bei relativ unvollständigen Prozeßkenntnissen anwendbar ist (spezieller Zuschnitt sowohl im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Mikrorechentechnik als auch der durch eine vorangegangene Analyse ermittelten Spezifik der Prozeßdynamik).

3. Modellermittlung

Veröffentlichungen, in denen die analytische Ermittlung des statischen und dynamischen Verhaltens der hier untersuchten



[1]) Doz. Dr. sc. techn. *Klaus-Peter Schulze* (43) studierte von 1959 bis 1965 Ingenieurbau an der Hochschule für Bauwesen Leipzig. Von 1965 bis 1971 im Verkehrsinstitut Magdeburg/Berlin tätig. Parallel dazu von 1966 bis 1971 im Fernstudium Regelungstechnik an der TH Magdeburg. Von 1971 bis 1980 im WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerung der Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik der TH Magdeburg als wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent tätig. 1975 Promotion A, 1979 Promotion B. Im Februar 1981 Berufung zum Hochschuldozenten für Prozeßanalyse an die Sektion Automatisierungsanlagen der TH Leipzig.

Dipl.-Ing. *Hans-Jörg Herrmann* (27) studierte von 1977 bis 1982 Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik an der TH Magdeburg. Seit März 1982 als wissenschaftlicher Assistent auf dem Forschungsgebiet Prozeßanalyse und adaptive Systeme an der Sektion Automatisierungsanlagen der TH Leipzig tätig.

Hochschulingenieur *Hans-Peter Sprenger* (37) studierte von 1966 bis 1969 an der IS für Energiewirtschaft und von 1969 bis 1973 im Fernstudium an der Sektion Informationstechnik der TU Dresden. Seit 1970 im VEB Kombinat Glasseide Oschatz (Stammbetrieb) in der Forschung tätig, gegenwärtig Abteilungsleiter Mikroelektronik und gleichzeitig Auftragsleiter Mikroelektronik des Kombinates.

technologischen Prozesse behandelt wird, sind bisher relativ wenig bekannt geworden. Der theoretische Zugang ist aufgrund der schwer erfaßbaren Einzelvorgänge außerordentlich schwierig. Damit ist die Möglichkeit einer fundierten Strukturwahl nicht gegeben. Im Zuge der Vorbereitung eines industriellen Einsatzfalles wurden daher für einen speziellen Speisertyp experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Eine Reihe wichtiger Einflußfaktoren auf die Spinnsicherheit ist bekannt, z. B. Gemengezusammensetzung, Sauerstoffkonzentration im Gewölbe des Speiserkanals, Strömungsverhältnisse im Speiser, Glasbadtemperatur sowie klimatische Faktoren. Der Einfluß der einzelnen Größen innerhalb ihres Zusammenwirkens auf die Spinnsicherheit ist jedoch z. Z. noch nicht in ausreichendem Maße quantitativ bestimmbar. Dies ist vor allem auch durch die schwierige meßtechnische Erfassung einiger Einflußgrößen begründet.
Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden nur diejenigen Größen berücksichtigt, die gegenwärtig am Prozeß bereits meßtechnisch erfaßt werden und nach den bisherigen langjährigen Erfahrungen auch die wesentlichsten Einflußfaktoren darstellen. Dazu gehören die Glasbad-, Gewölbe- und Düsenbodentemperaturen sowie die Brennerdurchsätze und Gas/Luft-Verhältnisse. Für die einzelnen Teilstrecken wurden statische bzw. dynamische Modelle ermittelt und damit die Grundlage für den ersten Entwurf einer neuen, effektiveren Automatisierungseinrichtung geschaffen. Die gefundenen Modelle können jedoch nur als Grobmodelle angesehen werden. Dies liegt nicht nur an der bereits erwähnten Meßungenauigkeit, sondern auch daran, daß sich einige Parameter in unvorhersehbarer Weise zeitlich langsam ändern (z. B. infolge Änderung der Geometrie der Speiserkanäle durch Auswaschung, Änderung der Gemengezusammensetzung).

4. Möglichkeiten zur Steuerung eines Speisers

Aufgrund der Tatsache, daß die Kenntnisse über den zu regelnden Prozeß relativ unvollständig sind, bieten sich prinzipiell solche Regelungsstrukturen an, die entweder nach dem Prinzip der Unempfindlichkeit (Empfindlichkeitsansatz im Entwurfskriterium) oder dem Prinzip der Adaption arbeiten. Da hier der Fall großer Parameteränderung vorliegt [1], wurden zunächst einmal die adaptiven Algorithmen in den Vordergrund der Untersuchungen gestellt. Bekanntlich gibt es bei den adaptiven Steueralgorithmen eine kaum noch überschaubare Anzahl von Lösungsvarianten [2] und [3]. Ungeachtet dessen lassen sich die adaptiven Systeme jedoch grob in solche mit Bezugsmodell (modelladaptive Systeme) und ohne Bezugsmodell (Selftuning-Regelungen) einteilen [4]. Welcher Typ in Abhängigkeit von der verwendeten Gerätetechnik und der Spezifik der Prozeßdynamik wirtschaftlich angewendet werden kann, muß im jeweiligen Anwendungsfall konkret entschieden werden. Unabhängig davon haben sich in den letzten Jahren diese zwei genannten wesentlichen Klassen adaptiver Systeme in einer Weise entwikkelt, die sie in zahlreichen praktischen Anwendungsfällen als durchaus gleichwertige Lösungen ein und desselben Problems erscheinen lassen. Ergänzend sei noch hinzugefügt, daß in den letzten Jahren die Realisierung von adaptiven Regelungen, insbesondere auch für den Mehrgrößenfall, mit Hilfe adaptiver Beobachter zur Zustands- und/oder Parameterschätzung an Bedeutung gewonnen hat und gegenwärtig ein intensiv bearbeitetes, aktuelles Forschungsgebiet darstellt [5] und [6].
Im Ergebnis erster Voruntersuchungen sowie bereits vorliegender Erfahrungen wird als prinzipielle Lösungsvariante für die Automatisierung eines Speisers ein Adaptivsystem ohne Bezugsmodell vorgeschlagen und gegenwärtig detailliert bearbeitet, u. a. auch unter Anwendung spezieller adaptiver Beobachter (Bild 2). Die technologische Anlage zur Glasseidenherstellung umfaßt (s. Bild 1) im wesentlichen die Teilsysteme Schmelzwanne, Vorkanal, Zwischenkanal und vier Speiserkanäle. Es bietet sich an, die Regelung nach einem dezentralen Konzept aufzubauen, d. h., das Gesamtsystem in die oben angegebenen Teilsysteme zu zerlegen und getrennt zu regeln. Die Kopplungen sind dabei in geeigneter Weise zu berücksichtigen [7] und [8]. Im einfachsten Fall würden getrennte Kaskadenregelungen (Regelgröße: Glasbadtemperatur; Hilfsregelgrößen: Gewölbetemperatur und Brennerdurchsatz) ohne Berücksichtigung der Kopplungen zum Erfolg führen. Den praktischen Gegebenheiten wird man jedoch besser gerecht, wenn man von einem Zustandsmodell des Gesamtsystems ausgeht, dieses in Teilsysteme zerlegt und unter Einbeziehung ihrer Kopplungen für jedes Teilsystem eine Zustandsrückführung entwirft. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß zwischen Kaskaden- und Zustandsregelung unter bestimmten Umständen eine enge Verwandtschaft besteht, die es ermöglicht, die Ergebnisse des einen Konzepts in das andere umzurechnen. Das kann Vorteile bringen, wenn von einer bestehenden Software ausgegangen werden soll. Voraussetzung für das oben genannte Konzept ist die Kenntnis eines geeigneten Zustandsmodelles und die Meßbarkeit der Zustandsgrößen. Für eine Reihe von Zustandsgrößen, z. B. Temperatur und Druck, ist diese Bedingung erfüllt. Die Sauerstoffkonzentration im Rauchgas ist dagegen unter den gegebenen Bedingungen nicht meßbar. An dieser Stelle wäre zu untersuchen, inwieweit ein Beobachter geeignet ist, diese Zustandsgrößen mit ausreichender Genauigkeit zu rekonstruieren. Da man einerseits nur von einer ungenauen Kenntnis der Prozeßparameter ausgehen und andererseits deren Veränderlichkeit in Betracht ziehen muß, bietet es sich an, anstelle eines herkömmlichen Zustandsbeobachters einen adaptiven Beobachter einzusetzen, der neben der Zustandsschätzung auch noch die Prozeßparameter identifizieren könnte (s. Bild 2). Ein solcher Beobachter wäre für jedes Teilsystem zu entwerfen. Dabei hätte er neben den Parametern des Teilsystems auch die nichtmeßbaren Koppelgrößen zu identifizieren. Aus diesem Konzept ergeben sich für die weitere Arbeit folgende Teilaufgaben:

- Ermittlung eines geeigneten Zustandsmodelles
- Nachweis der größeren Leistungsfähigkeit einer dezentralen (Zustands-) Regelung gegenüber unabhängig voneinander entworfenen Kaskadenregelungen
- unter der Vielzahl adaptiver Beobachter ist ein solcher auszuwählen, der bei minimalem Rechenaufwand und minimalen Forderungen an das Eingangssignal des gegebenen Prozesses gute Ergebnisse liefert.

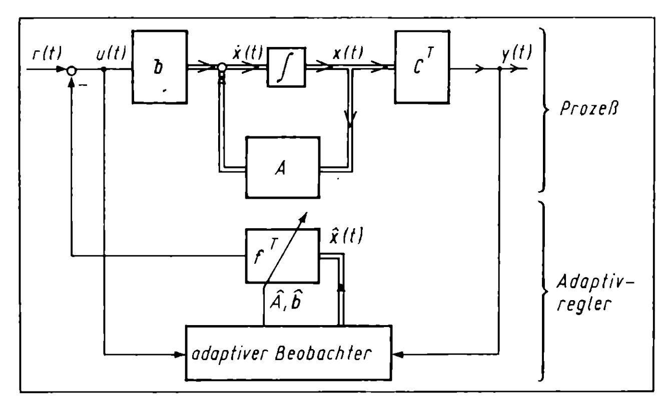


Bild 2. Struktur einer adaptiven Regelung ohne Bezugsmodell (Zustandsregelung mit adaptivem Beobachter)

Zusammenfassung

Nach Erläuterung der Technologie der Glasseidenherstellung werden die wesentlichsten Aufgaben für die Automatisierung genannt sowie der gegenwärtige Entwicklungsstand kurz eingeschätzt. Als wichtiger Teilprozeß werden die Vorgänge im Speisersystem angesehen. Im Anschluß daran werden die Situation auf dem Gebiet der Modellbildung charakterisiert und in Grundzügen eine Konzeption zur adaptiven Steuerung des Glasseidenherstellungsprozesses vorgestellt. Abschließend werden die wichtigsten Teilaufgaben zur Lösung der behandelten Problematik angegeben.

Literatur

[1] *Schulze, K.-P.:* Entwurf von Mehrgrößenregelungen an Prozessen mit zeitabhängigen Parametern unter Berücksichtigung von Empfindlichkeitsansätzen bzw. nach dem Prinzip der Adaption. msr, Berlin 23 (1980) 7, S. 371–373.
[2] *Landau, I. D.:* Adaptive control – the model reference approach. New York: Dekker 1979.
[3] *Narendra, K.; Peterson, B. B.:* Recent developments in adaptive control. In: Methods and applications in adaptive control (ed.: *H. Unbehauen*). Berlin: Springer-Verlag 1980.
[4] *Harris, C. J.; Billings, B. A.* (Hrsg.): Self-tuning and adaptive control: theory and application. IEE control engineering series 15. New York: Peter Peregrinus Ltd. 1981.
[5] *Ichikawa, K.:* Continuous time adaptive identification and control algorithmus via newly developed adaptive laws. Int. J. Contr. 16 (1982) 5, pp. 819–831.
[6] *Kreißelmeier, G.:* On adaptive state regulation. IEEE Trans. Autom. Contr. AC-27 (1982) Febr., pp. 3–17.
[7] *Kuhn, U.:* Verfahren zur dezentralen Zustandsbeobachtung linearer Systeme mit komplexer Struktur. Regelungstechnik 31 (1983) 2, S. 44–50.
[8] *Lunze, J.:* Übersicht über Verfahren zum Entwurf dezentraler Regler für lineare zeitinvariante Systeme. msr, Berlin 23 (1980) 6, S. 315–322.

msr 7981

Ch. Döschner; H. Schulz[1])

Optimierung der Verbrennungsluftzufuhr braunkohlengefeuerter Dampferzeuger über die Kreuzkorrelationsmethode

0. Einleitung

Die Forderungen nach einer Erhöhung des Wirkungsgrades und Verringerung der Umweltbelastungen braunkohlengefeuerter Dampferzeuger führte in den letzten Jahren zu einer Reihe technologischer und regelungstechnischer Entwicklungen [1]. Durch den Einsatz moderner Rechentechnik auch zur Kraftwerksregelung (vgl. [2]) werden günstigere gerätetechnische Bedingungen zur Realisierung höherer Algorithmen der Prozeßsteuerung geschaffen. Daraus resultierend ergeben sich u. a. auch für die Optimierung der Verbrennungsluftzufuhr braunkohlengefeuerter Dampferzeuger neue Möglichkeiten. Im Beitrag wird ein Verfahren zur Verbrennungsluftoptimierung auf der Grundlage einer Kreuzkorrelationsmethode vorgestellt.

1. Optimierungskriterium

Ziel der Optimierung ist es, einen größtmöglichen Wirkungsgrad des Dampferzeugers zu erzielen. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Feuerführung, d. h., nur bei einer optimalen Verbrennungsluftzufuhr kann sein Maximalwert erreicht werden. Die Verbrennungsluftzufuhr steht in engem Zusammenhang mit der Schadstoffemission des Prozesses. Es ist zu erwarten, daß der Anteil bestimmter Schadstoffe durch eine Verbrennungsluftoptimierung reduziert wird.
So führt eine zu geringe Luftzufuhr zu verstärkten Rußablagerungen und Verschlackungen. Das verschlechtert die Wärmeübertragungseigenschaften und verursacht häufigere Stillstandszeiten. Die Kohlenmonoxidbildung wird dabei verstärkt, und im Rauchgas sind mehr unverbrannte Kohlenwasserstoffe enthalten. Darüber hinaus führt eine unvollkommene Verbrennung zu einer Erhöhung kanzerogener Stoffe im Rauchgas [3]. Durch eine zu hohe Luftzufuhr wird der Wirkungsgrad vermindert. Die Stickoxidemission und die SO_3-Bildung sind erhöht. Auch die Rauchgastemperatur wächst, was zu einer Verringerung der Leistung des Elektrofilters und damit zu einer Verstärkung der Umweltbelastungen durch Flugachse führt [4].
Eine optimale Verbrennungsluftzufuhr und somit ein hoher Wirkungsgrad des Dampferzeugers werden dann erreicht, wenn die Verbrennungsverluste minimal sind. Die von der Feuerführung abhängigen Verlustkomponenten sind nach [5]

- die Verluste durch unverbrannte Feststoffe
- die Verluste durch gasförmig Unverbranntes
- die Verluste durch die fühlbare Wärme des Abgases.

Nicht alle Verlustanteile sind meßtechnisch laufend zu erfassen. Als Gütekriterium der Optimierung sollen die Kaminverluste Q_V gelten. Diese setzen sich aus den Verlusten durch gasförmig Unverbranntes und durch die Wärme des Abgases zusammen; sie können im Echtzeitbetrieb ermittelt werden. Dabei werden die Verluste durch unverbrannte Feststoffe nicht berücksichtigt, wodurch Abweichungen vom Wirkungsgradminimum auftreten können [6].

[1]) Doz. Dr. sc. techn. *Christian Döschner* (47) studierte von 1956 bis 1961 Regelungstechnik und Feinmechanik an der TU Dresden. Von 1961 bis 1977 als wissenschaftlicher Mitarbeiter, Assistent und Oberassistent an der Sektion Technische Kybernetik/Elektrotechnik der TH Magdeburg. 1968 Promotion A. Von 1977 bis 1978 Zusatzstudium am Moskauer Chemisch-technologischen Institut. 1977 Promotion B. Von 1978 bis 1981 Gruppenleiter im VEB GRW Teltow. 1981 Berufung zum Hochschuldozenten an die TH Magdeburg, Sektion TK/ET.

Dipl.-Ing. *Harald Schulz* (28) studierte von 1977 bis 1982 an der TH Magdeburg, WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerungen. Seither dort als Forschungsstudent tätig.

Die Berechnung der Kaminverluste Q_V erfolgt nach (1)

$$Q_V = (K_1 \Delta\delta + K_2\,CO)\,(1 + K_3\,O_2) \qquad (1)$$

aus der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und angesaugter Luft $\Delta\delta$, den Konzentrationen CO und O_2 im Rauchgas und Konstanten, die die Brennstoffeigenschaften berücksichtigen (vgl. [5]). Die Kaminverluste besitzen, abhängig von der Luftzufuhr ν, einen ausgeprägten Extremwert (Bild 1). Die Suche dieses minimalen Wertes erfolgt unter Benutzung eines Kreuzkorrelationsverfahrens.

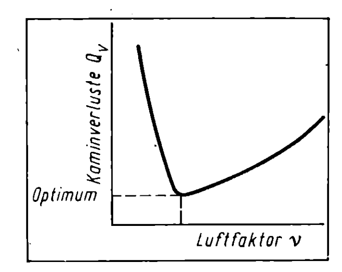


Bild 1. Kaminverluste $Q_V(\nu)$

2. Optimierung auf der Grundlage des Kreuzkorrelationsverfahrens

Kreuzkorrelationsverfahren sind vor allem zur Identifikation linearer dynamischer Systeme bekannt. Hier wird dieses Verfahren zur Bestimmung der Optimierungsschrittrichtung genutzt (vgl. [7]).
Der Verbrennungsprozeß wird als ein nichtlineares dynamisches System betrachtet, dessen statische Kennlinie ein Minimum besitzt. Im Bild 2 wird das Prinzip des Korrelationsverfahrens dargestellt. Auf den Prozeß wird ein Signal $u = U \cdot \sin \omega_s t$ aufgeschaltet. Unter der Annahme, daß die Amplitude U dieses Referenzsignals klein ist, kann um den Arbeitspunkt näherungsweise lineares Verhalten der Strecke angenommen werden. Am Streckenausgang entsteht dann ein Signal $x = X \cdot \sin(\omega_s t + \varphi)$ mit der Amplitude X und der Phasenverschiebung φ. Dieses Signal wird mit dem Eingangssignal und dem um 90° phasenverschobenen Eingangssignal multipliziert. Aus der Integration über eine ganzzahlige Folge von Testsignalschwingungen ergibt sich ein Maß für den Real- und Imaginärteil des Frequenzganges (vgl. z. B. [8]):

$$\operatorname{Re}\{G(j\omega)\} = \frac{2}{|U|^2}\,\frac{1}{T_M}\int_0^{T_M} |X|\,|U| \sin \omega_s t \cdot \sin(\omega_s t + \varphi)\,dt \qquad (2a)$$

$$\operatorname{Im}\{G(j\omega)\} = \frac{2}{|U|^2}\,\frac{1}{T_M}\int_0^{T_M} |X|\,|U| \cos \omega_s t \cdot \sin(\omega_s t + \varphi)\,dt. \qquad (2b)$$

Für den Verbrennungsprozeß ergeben sich hieraus bei Realisierung eines sinusförmigen Eingangssignals und unter Verwendung diskret gemessener Werte der Kaminverluste folgende Beziehungen für ein Wertepaar Re* und Im*, die näherungsweise dem Real- bzw. Imaginärteil des Frequenzganges proportional sind:

$$\operatorname{Re}^* = \sum_{n=0}^{N-1} Q_V(n \cdot T_0) \sin n\omega_s T_0 \qquad (3a)$$

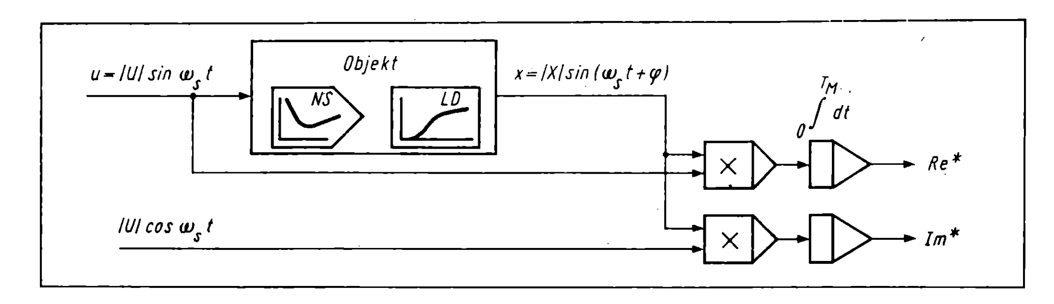


Bild 2. Prinzip des Korrelationsverfahrens

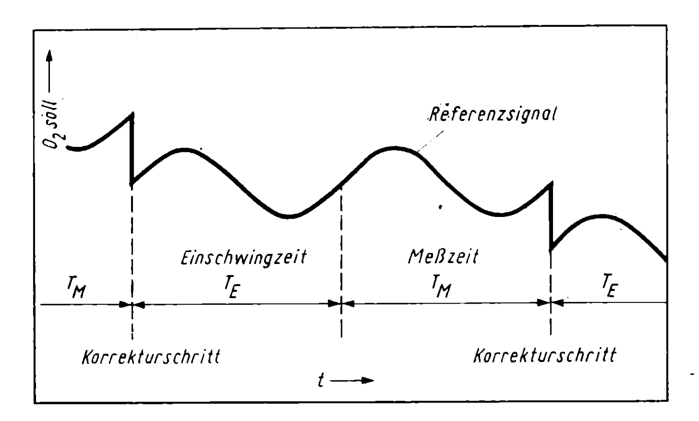


Bild 3. Zeitlicher Verlauf des Eingangssignals zwischen zwei Optimierungsschritten

$$\mathrm{Im}^* = \sum_{n=0}^{N-1} Q_V(n \cdot T_0) \cos n\omega_S T_0 \,. \tag{3b}$$

Aus dem Vorzeichen des Wertes Re* bzw. Im* ergibt sich die Lage des momentanen Arbeitspunktes in Relation zum Minimalwert der Kaminverluste. Der Betrag $\sqrt{\mathrm{Re}^{*2} + \mathrm{Im}^{*2}}$ läßt Schlüsse auf die Abweichung vom Minimum zu. Aus dem Vergleich dieses Wertes mit einem Festwert F_{BV} folgt die Entscheidung für einen kleinen oder großen Korrekturschritt.
Im Bild 3 ist der zeitliche Verlauf des Eingangssignals zwischen zwei Optimierungsschritten dargestellt. Nach einem Korrekturschritt ist eine Einschwingzeit vorgesehen, da das sinusförmige Eingangssignal in seiner Wirkung auf Q_V sonst zu stark verfälscht wird. Die Meßzeit T_M und die Einschwingzeit T_E betragen jeweils ganzzahlige Vielfache der Periodendauer des sinusförmigen Eingangssignals.
Der Optimierungsalgorithmus arbeitet mit einer unterlagerten Verbrennungsluftregelung zusammen, die als Kaskade mit dem Sauerstoffgehalt des Abgases als Hauptregelgröße realisiert wird (Bild 4). Als Hilfsregelgröße dieses Systems tritt die Verbrennungsluftmenge auf. Die notwendigen Eingangs- und Steuersignale der Optimierung werden als Sollwertänderungen dieses Regelungssystems wirksam. Durch Wirkung der Steuersignale wird das Minimum schrittweise erreicht (vgl. Bild 6).
Das Gesamtsystem wird durch eine autonome Automatisierungseinheit des Systems audatec, die im speziellen Fall aus einer Master-Slave-Kombination besteht, realisiert. Der Optimierungsalgorithmus wird als Grundebenenprogramm im Masterrechner implementiert.
Für eine praktikable Optimierung nach der vorgeschlagenen Methode ist eine Anpassung verschiedener Parameter des Optimierungsalgorithmus an das Prozeßverhalten notwendig.
Festzulegen sind folgende Parameter:

- Periodendauer des sinusförmigen Referenzsignals $T_S = \frac{2\pi}{\omega_S}$
- Tastzeit T_0
- Amplitude des Referenzsignals U
- Einschwingzeit T_E
- Meßzeit T_M (entspricht der Integrationsdauer)
- Korrekturschrittweiten s
- Betragsvergleichswert F_{BV}.

Der Algorithmus wurde im VEB GRW Teltow an einem Master-Slave-Rechnersystem im Echtzeitbetrieb und an der TH Magdeburg an einem Testrechner im Schrittbetrieb untersucht. Ziel dieser Untersuchungen war es, Hinweise für die Festlegung der relevanten Parameter (s. o.) am Prozeß zu erhalten und den Einfluß von Störungen auf den Optimierungsvorgang zu analysieren.

3. Simulation des Verfahrens

Bei den durchgeführten Laboruntersuchungen wurde der Prozeß digital entsprechend Bild 5 simuliert. Die aufgenommenen Werte der Kaminverluste werden durch ein normalverteiltes Störsignal im Sauerstoffmeßkanal verfälscht.
Die Untersuchungen zeigen, daß der Wahl der Periodendauer des Referenzsignals große Bedeutung geschenkt werden muß. Abhängig von den Zeitkonstanten der Strecke erfolgt eine Phasenverschiebung φ. Eine mögliche Abweichung von dieser Phasenlage, verursacht durch Prozeßverhaltensänderung oder Prozeßmodellfehler, darf nicht zu einer Verschiebung des Verhältnisses des Vorzeichens von Re* bzw. Im* zur Lage des Arbeitspunktes vom Optimum und damit zu falschen Korrekturschritten führen. Der Einfluß der Phasenlage auf die Korrekturschrittrichtung wird ausführlich in [9] diskutiert. Für den untersuchten Prozeß wird die Periodendauer des Referenzsignals so gewählt, daß die Phasenverschiebung 180° beträgt.
Auf den Prozeß wurden Störungen mit einer unterschiedlich großen Amplitude K_S aufgeschaltet. Die Meßergebnisse (Bild 6) zeigen eine relativ große Störsicherheit der Minimumsuchfolge. Mit wachsender Störamplitude steigt die Zahl der Fehlschritte und die Abweichung vom Optimalwert (Tafel 1).

Tafel 1. Vergleich der Untersuchungsergebnisse bei Störeinfluß

Faktor K_S	Fehlschritte bis zum Erreichen des Optimums	mittlere quadratische Abweichung vom Optimum
0,1	0	1,83
0,2	0	1,95
0,4	1	2,03
0,8	3	2,56
1,6	3	2,59

Die Wahl der Tastzeit erfolgt nach den üblichen Festlegungen für lineare Systeme aus der Einschwingdauer des Kaskadenregelungssystems.
Bei den Untersuchungen wurden die Meßzeit T_M und die Einschwingzeit T_E jeweils als ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer T_S des Eingangssignals variiert. Die Ergebnisse sind in Tafel 2 dargestellt. Es zeigt sich, daß eine zu kleine Meßzeit zu einer großen Zahl von Fehlschritten führt und somit die Suchzeit verlängert wird. Eine größere Meßzeit führt einerseits zu einer Verringerung von Fehlschritten, andererseits jedoch er-

Tafel 2. Variation der Meßzeit T_M und der Einschwingzeit T_E

T_E in min	T_M in min	Fehlschritte bis zum Erreichen des Optimums	Zeit bis zum Erreichen des Optimums	Mittlere quadratische Abweichung vom Optimum
16	16	10	1088	4,92
16	32	3	864	4,26
16	48	0	896	3,96
0	32	1	512	4,09

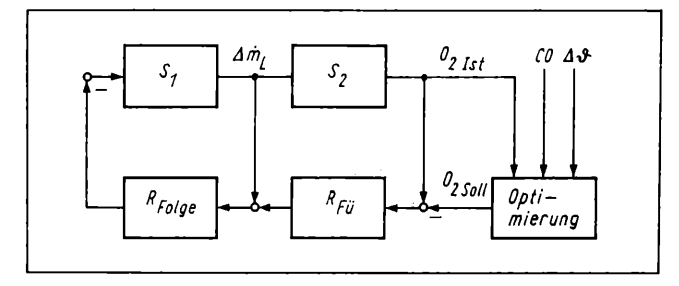


Bild 4. Eingriff des Optimierungsalgorithmus

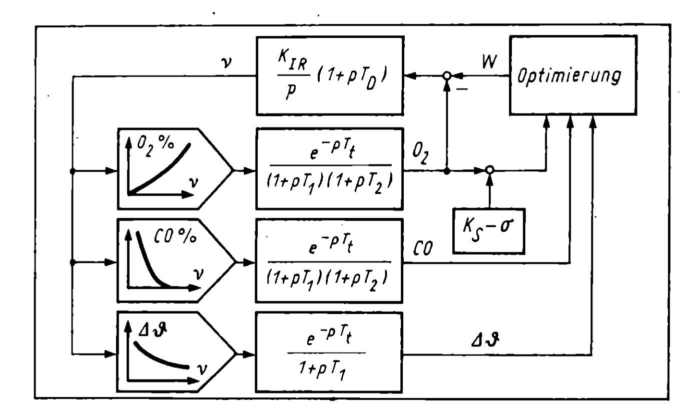


Bild 5. Struktur des simulierten Prozesses ▶

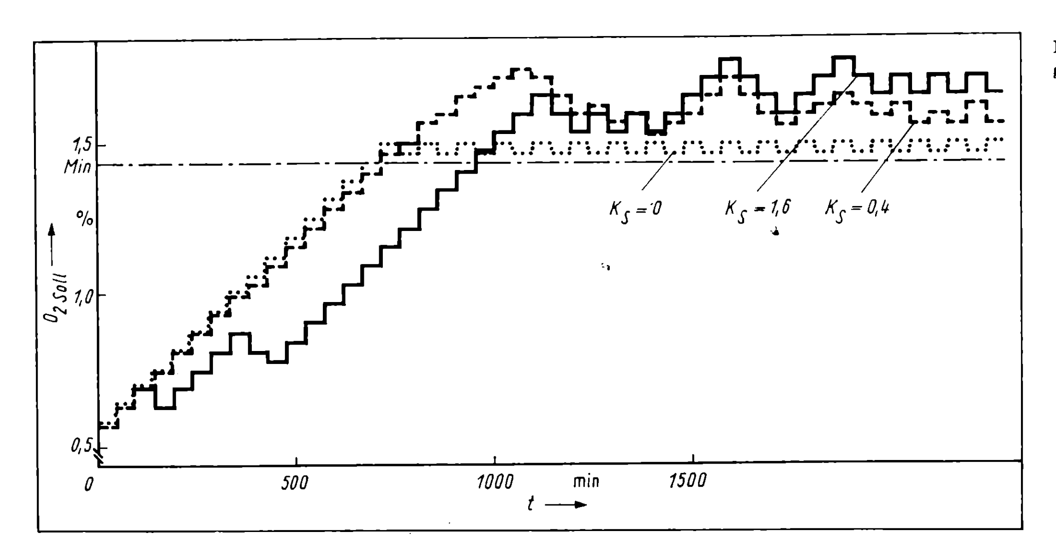


Bild 6. Minimumsuche bei gestörtem Prozeß

höht sich die Zeit zwischen zwei Korrekturschritten. Aus diesen Überlegungen ist jeweils eine optimale Meßzeit unter Berücksichtigung der realen Prozeßstörungen zu bestimmen. Unter gewissen Bedingungen kann $T_E = 0$ gewählt werden.
Weiterhin wurde der Einfluß der Korrekturschrittweite auf die Optimierung untersucht. Durch eine große Korrekturschrittweite wird die Zeit bis zum Erreichen des Minimums verringert, es treten jedoch größere Pendelungen um den Optimalwert auf. Hier zeigt sich die Zweckmäßigkeit, mit verschiedenen Korrekturschrittweiten zu arbeiten.
In Optimumsferne wird mit großer Schrittweite und in Umgebung des Optimums mit verkleinerter Schrittweite gearbeitet. Als Entscheidungskriterium für die Umschaltung auf verkleinerte Schrittweite wird der Wert $\sqrt{\mathrm{Re}^{*2} + \mathrm{Im}^{*2}}$ benutzt, der jeweils mit dem F_{BV}-Wert verglichen wird.
Die Festlegungen von konkreten F_{BV}-Werten, der Korrekturschrittweiten und der Amplitude des Eingangssignals sind im Zusammenhang zu betrachten. Sie hängen von den Störverhältnissen und dem konkreten Prozeßverhalten ab und sind durch Versuche am realen Objekt zu ermitteln.

Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein Verfahren, das durch Steuerungen der Verbrennungsluft braunkohlengefeuerter Dampferzeuger deren Wirkungsgrad maximiert. Das Verfahren benutzt die Frequenzgangmeßmethode durch Ermittlung der Kreuzkorrelation und ist auf Realisierung durch Mikrorechner orientiert.
Ausgehend von technologischen Zusammenhängen wird der Optimierungsalgorithmus erläutert. Ergebnisse von Simulationsstudien werden vorgestellt. Sie dokumentieren die Arbeitsfähigkeit der Steuerung, zeigen aber auch, daß ein relativ großer Zeitaufwand zur Extremwertsuche notwendig wird.

Literatur

[1] *Leikert, K.:* Stand und Entwicklungslinien der Kohlenstaubfeuerung. BWK, Düsseldorf 34 (1982) 3, S. 123–131.
[2] *Barge, W.; Haak, L.; Pape, W.:* Einsatz autonomer Automatisierungseinrichtungen des Systems audatec in Kraftwerken. VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau — Wissenschaftlich-technische Information 18 (1982) 6, S. 230–234.
[3] *Cirulnikov, L. M.* u. a.: Über den Gehalt von kanzerogenen Stoffen in den Rauchgasen bei der Verfeuerung von Öl und Gas (in Russ.). Teploenergetika 23 (1976) 9, S. 32–35.
[4] *Jaworski, R. J.* u. a.: Flue gas conditioming to reduce boiler emission. Combustion 52 (1980) 6, S. 26–31.
[5] *Profos, P.* u. a.: Studien und Betriebsversuche über die automatische Optimierung des Luftüberschusses bei einem braunkohlengefeuerten Dampferzeuger. NT (1967) A 2, S. 47–72.
[6] *Wierick, D.; Schneider, W.:* Gütekriterien zur automatischen Optimierung des Luftverhältnisses und der Abgastemperatur kohlenstaubgefeuerter Dampferzeuger. Energietechnik 20 (1971) 5, S. 207–213.
[7] *Feldbaum, A. A.:* Rechengeräte in automatischen Systemen. München: R. Oldenbourg Verlag 1962.
[8] *Reinisch, K.:* Analyse und Synthese kontinuierlicher Steuerungssysteme. Berlin: VEB Verlag Technik 1979.
[9] *Stephan, K.:* Beitrag zur Verbrennungsluftoptimierung eines Großdampferzeugers. Diplomarbeit, TH Magdeburg 1982. msr 7969

D. Kochan; K.-H. Zehe[1])

Effektiver Datenfluß durch softwaremäßige Funktionserweiterung der CNC-Steuerung für Probleme der NC-Fräsbearbeitung

0. Einleitung

Mit der 4. Generation numerischer Steuerungstechnik, den speicherprogrammierten CNC-Steuerungen, ist ein qualitativer Sprung in der gesamten effektiven Nutzung vorbereitet. Gegenüber den vorangegangenen Steuerungsgenerationen können die grundsätzlichen Verbesserungen durch zwei Kategorien von Vorteilen herausgestellt werden:

— Merkmale und Funktionen, die vom Steuerungs- und Maschinenhersteller serienmäßig vorbereitet sind
— funktionelle Erweiterungen, die anwendungsorientiert mit der speicherprogrammierten Steuerung verwirklicht werden können.

Zur erstgenannten Kategorie gehören alle die Merkmale, die das Prinzip der CNC-Steuerung (Computerized numerical control — rechnerintegrierte Steuerung) mit charakterisieren, z. B.

— erleichterte Bedienung — Programmediting — Wartung und Diagnose	über Bildschirmausgabe
— Programmspeicherung — Unterprogrammtechnik	mit Hilfe spezieller Speicherbereiche

Zur zweiten Kategorie gehören die Eigenschaften, die das Vermögen der installierten Mikrorechner ausnutzen, nämlich insbesondere die Möglichkeiten der Ausführung von Rechenoperationen. Darüber soll am Beispiel effektiver Fräsbearbeitung für doppelt gekrümmte Flächen berichtet werden, wobei von der grundsätzlichen mit der CNC 600 gegebenen Voraussetzung, der 3D-Linearinterpolation, ausgegangen wird.

[1]) Prof. Dr. sc. techn. *Detlef Kochan* (48) studierte bis 1961 an der TH Dresden Fertigungstechnik. Von 1967 bis 1970 als Abteilungsleiter im Direktionsbereich Forschung und Entwicklung des VEB Carl Zeiss JENA und anschließend als stellvertretender Hauptabteilungsleiter im Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus tätig. 1970 Berufung zum Dozenten und 1975 zum ordentlichen Professor für Fertigungstechnik/Technologische Programmierung an die TU Dresden. Promotion A 1965, Promotion B 1971. DDR-Mitglied im IFIP-TC 5.

Dipl.-Ing. *Karl Heinz Zehe* (29) studierte von 1976 bis 1980 Fertigungsprozeßgestaltung an der TU Dresden. Seither als wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der TU Dresden tätig.

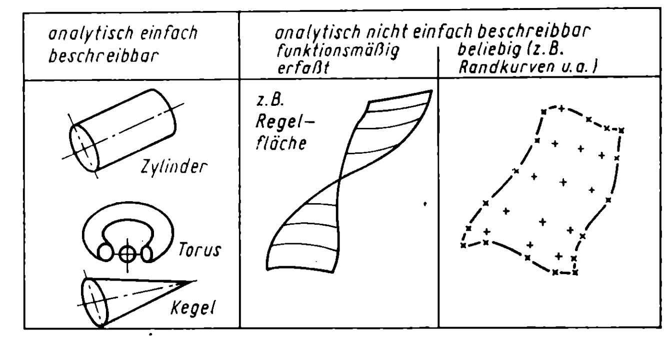


Bild 1. Schematische Darstellung geometrisch komplizierter Flächen

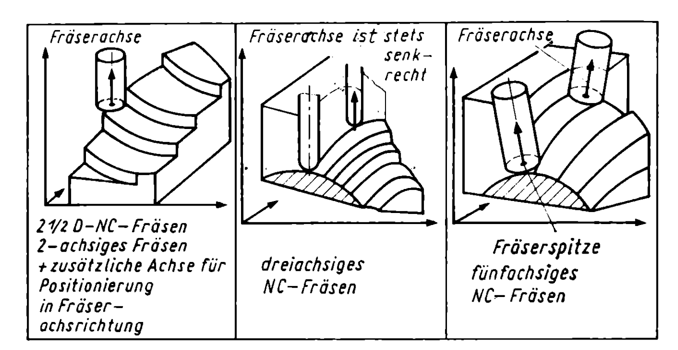


Bild 2. Mehrachsenfräsverfahren

1. Charakteristik der hochproduktiven Fräsbearbeitung für geometrisch komplizierte Teile

1.1. *Einordnung der geometrisch komplizierten Flächen*

Je nach der mathematischen Darstellbarkeit 3 dimensionaler Flächen, auch als doppelt gekrümmte Flächen bezeichnet, lassen sich diese in die Gruppen [1]

- analytisch einfach beschreibbare (z. B. Kegel, Torus ...)
- analytisch nicht einfach beschreibbare, aber funktionsmäßig erfaßbare (z. B. Regelflächen, Verdichter-, Turbinenschaufel)
- funktionsmäßig nicht erfaßbare (z. B. Karosserieflächen, Konsumgüter), i. allg. als Modell vorliegende

Flächen einteilen (Bild 1).

1.2. *Mehrachsen-NC-Fräsen*

Das NC-Fräsen doppelt gekrümmter Flächen erfordert hardwareseitig Maschinen und Steuerungen, die eine Simultanbewegung in mindestens zwei Achsen (+ eine Achse linear verstellbar) bzw. in drei bis fünf Achsen ermöglichen. In Abhängigkeit der Genauigkeitsanforderungen und der Produktivität kommen generell folgende Verfahren in Betracht, wie im Bild 2 dargestellt:

- $2^1/_2$ D-NC-Fräsen (Vorteil: produktive Fräswerkzeuge einsetzbar)
- 3D-NC-Fräsen (Vorteil: alle o. g. mathematisch definierbaren Flächen bearbeitbar)
- 4 ... 5D-NC-Fräsen (Vorteil: produktivste Bearbeitung aller Flächenarten realisierbar).

Für die letztgenannte Möglichkeit stehen z. Z. noch keine geeigneten Steuerungen und Maschinen eigener Produktion zur Verfügung.

1.3. *Betrachtungen zum derzeitigen Datenfluß*

Der derzeitige Datenfluß für das Fräsen geometrisch komplizierter Teileformen beginnt, wie auch für andere Verfahren im Zusammenhang mit der rechnergestützten Programmierung [2], mit dem Erstellen eines Quellenprogramms und endet beim vor- bzw. fertig bearbeiteten Werkstück.
Ausgehend vom Quellenprogramm erfogt üblicherweise die Umsetzung auf einen Datenträger (Lochkarte, Lochstreifen), die Verarbeitung mit dem Prozessor und die Nachverarbeitung mit dem Postprozessor.
Die im Prozessor nach Verarbeitung der geometrischen und technologischen Daten des Quellenprogramms errechneten Werkzeugpositionen und benötigten Werte, wie Flächennormalen, Tangenten, Krümmungsradien, werden im Postprozessor an die spezielle Auslegung der NC-Fräsmaschine mit zugehöriger Steuerung angepaßt.
Das Ergebnis dieser Verarbeitungsphase in der EDV-Anlage sind die Steuerdaten (meist in Form eines Lochstreifens) für die numerische Steuerung der NC-Fräsmaschine. Die Fräsbearbeitung doppelt gekrümmter Flächen ist gekennzeichnet durch

- komplizierte und datenaufwendige Flächenbeschreibungen einschließlich eventueller Berandungen
- große Datenraten der NC-Steuerprogramme zur Bearbeitung der Flächen.

Die Beherrschung der großen Datenmengen (z. B. ergibt sich für eine Autofläche 1 m × 1,5 m bei einer Oberflächengenauigkeit von 0,1 mm, Fräserdurchmesser 16 mm und einer 3D-NC-Fräserbearbeitung ein Datenumfang von etwa 460 Kbyte ≙ 1150 m Steuerlochstreifen) und die Korrektur von Fehlern direkt an der Werkzeugmaschine stellen derzeit besondere Probleme dar.

2. Verbesserter Datenfluß

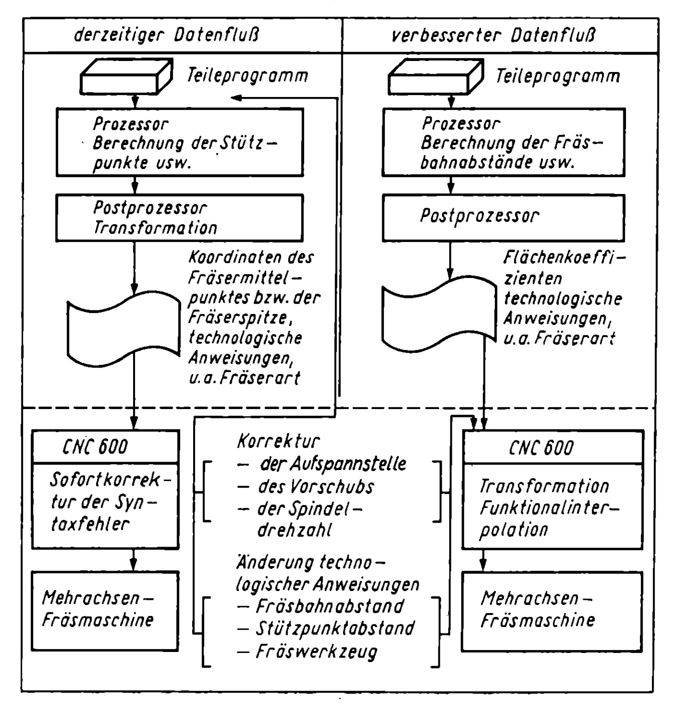
Im Ergebnis von Untersuchungen zur Verlagerung von Funktionen, die üblicherweise vom Programmiersystem realisiert werden müssen, in die CNC-Steuerung für die Mehrachsenbearbeitung konnte ein effektiver Datenfluß geschaffen werden, der die genannten Probleme weitestgehend berücksichtigt und dessen Vorteile in verbesserten Korrekturmöglichkeiten, einer Datenreduzierung und einer Zeiteinsparung bei der NC-Steuerprogrammerstellung liegen (Bild 3.).
Die softwaremäßigen Funktionserweiterungen basieren derzeit auf

- der Generierung der Werkzeugbahn
- Eingabe und Korrekturmöglichkeiten direkt an der Maschine.

2.1. *Generierung der Werkzeugbahn*

Der zur Realisierung des verbesserten Datenflusses erstellte Datenträger (Lochstreifen) enthält nicht wie bisher die Stützpunkte der Fräsbahn als geometrische Informationen, sondern die mathematische Beschreibung der herzustellenden Fläche und technologische Angaben. Je nach Zweck und Art der Fläche können verschiedenartige Flächenbeschreibungsformen genutzt und angewendet werden.
Eine entsprechende Software ermittelt aus diesen Informationen die Oberflächenpunkte mit den dazugehörigen Flächennormalen und je nach Fräserart den Fräsermittelpunkt und somit die Fräsbahn.
Die Koordinatenwerte der Fräserführungsbahn werden mit der Auflösung der Maschinen-Meß-Systeme (1 µm) an den Linearinterpolator weitergeleitet. Die Rechengenauigkeit selbst ist von dem verwendeten Mikrorechner abhängig. Für die CNC 600 mit eingebauten K 1520 Schaltkreisen kann mit Genauigkeiten von 7 Stellen nach dem Komma gerechnet werden. Beispiele der Fräsbahngenerierung und deren Vorteile sind im Abschn. 3. beschrieben.

Bild 3. Gegenüberstellung von derzeitigem und verbessertem Datenfluß



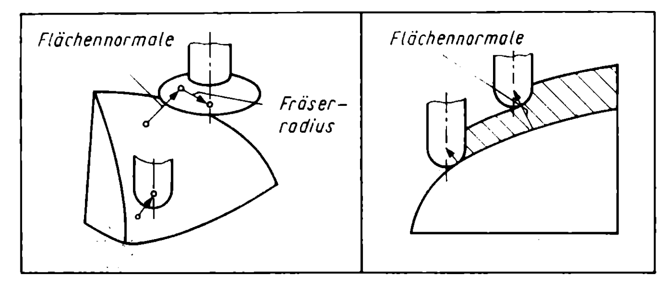


Bild 4. Radius- und Aufmaßkorrektur

2.2. *Eingabe- und Korrekturmöglichkeiten an der Maschine*

Unter Nutzung der Software der Fräsbahngenerierung und weiterer Möglichkeiten, die der Korrektur an der Maschine dienen, ergeben sich folgende Vorteile:

- Verbesserung der Toleranzen
- hohe Flexibilität bei Einsatz und Nutzung der Werkzeuge durch Eingabe der Werkzeuggeometrie an der Maschine auch während der Bearbeitung
  (Die direkte Eingabe der Werkzeugkorrekturen an der Steuerung wird durch die direkte Berechnung der Oberflächenpunkte und deren Flächennormalen im Steuerungsrechner ermöglicht. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Bearbeitung einer gekrümmten Fläche bei Bedarf zu unterbrechen und mit einem Werkzeug anderen Typs und mit anderen Abmessungen fortzusetzen.)

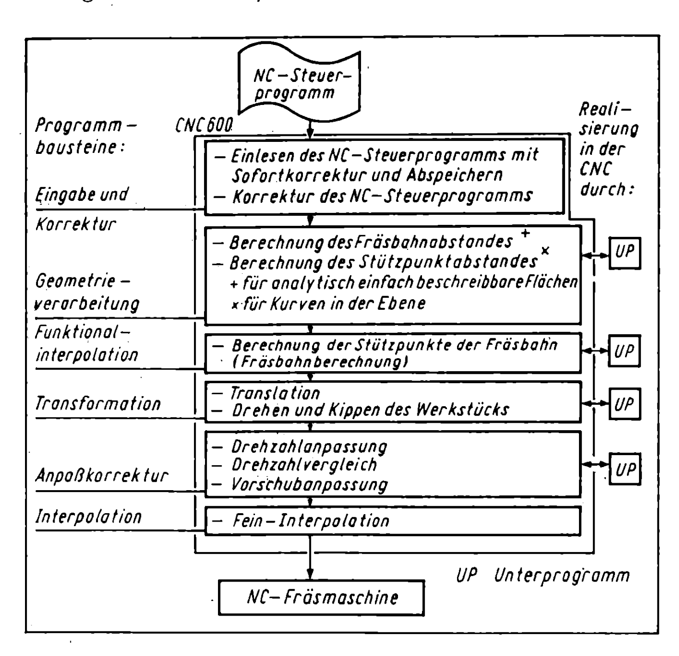
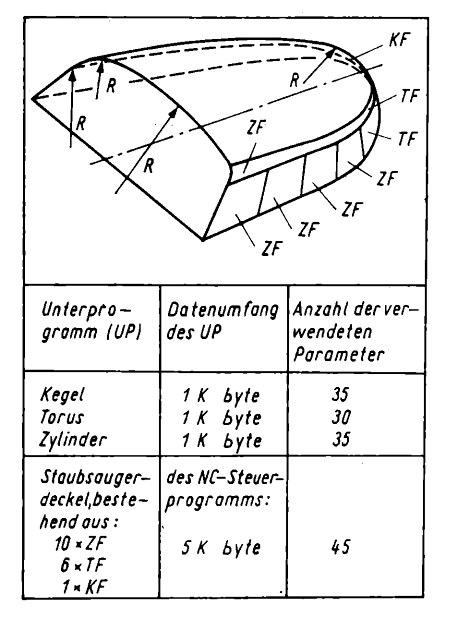


Bild 5. Vereinfachter Datenfluß innerhalb der CNC-Steuerung



Unterprogramm (UP)	Datenumfang des UP	Anzahl der verwendeten Parameter
Kegel	1 K byte	35
Torus	1 K byte	30
Zylinder	1 K byte	35
Staubsaugerdeckel, bestehend aus: 10 × ZF 6 × TF 1 × KF	des NC-Steuerprogramms: 5 K byte	45

Bild 6. Fräsen analytisch einfach beschreibbarer Flächen

a) Staubsaugerdeckel; TF Teilfläche eines Torus; KF Teilfläche eines Kegels; ZF Teilfläche eines Zylinders
b) Aussagen zu den Unterprogrammen

- Veränderung der Fräsbahnabstände während der Bearbeitung; Schruppbearbeitung oder Schlichtbearbeitung mit einem NC-Steuerprogramm ist möglich
- Änderung der Schnittiefen in Normalrichtung der Fläche bzw. senkrecht zur Fräserachsrichtung ist gegeben
- Änderung der Aufspannstelle des Werkstücks durch Eingabe der Werte für die Verschiebung und/bzw. der Kipp- und Drehwinkel.

Im Bild 4 wird die Radius- und Aufmaßkorrektur schematisch dargestellt.
Diese direkten Korrekturen an der Steuerung ersparen das Erstellen eines neuen Steuerlochstreifens über einen weiteren Prozessor- und Postprozessorlauf. Durch diese Vereinfachung und die verschiedenen Möglichkeiten der Steuerdatenänderung wird die Test- und Fertigungszeit erheblich gekürzt.

2.3. *CNC-Informationsverarbeitung*

Bild 3 ist zu entnehmen, daß im verbesserten NC-Datenfluß die CNC-Steuerung in der zeitlichen Organisation des Steuerablaufs höher beansprucht ist. Zum Gewährleisten der erforderlichen Rechenleistung werden die zentrale Recheneinheit und vor allem die Möglichkeit der Arithmetikeinheit, die über Parameter adressierbar ist, genutzt.
Die Berechnungen, die für die einzelnen Funktionen notwendig sind und über die Parametertechnik erfolgen, sind relativ zeitaufwendig und laufen teilweise in Echtzeitverarbeitung ab. Die zeitliche Belastung des Rechners steigt weiterhin mit größer werdender Vorschubgeschwindigkeit und zunehmender Genauigkeit, d. h. Verringerung der Stützpunktabstände, an. Diese Tatsachen wurden bei der softwaremäßigen Erweiterung berücksichtigt, so daß sich die umfangreichen Berechnungen nicht negativ auf das Verfahrverhalten auswirken. Daraus läßt sich der im Bild 5 dargestellte vereinfachte Datenfluß innerhalb der CNC-Steuerung ableiten.

3. Praktische Ergebnisse

Basierend auf den vorher genannten Ergebnissen wurden für folgende Problemstellungen repräsentative Testbeispiele bearbeitet:

- Schaffung von Unterprogrammen für die Bearbeitung analytisch einfach beschreibbarer Flächen
- 3D-NC-Fräsen analytisch nicht einfacher, aber funktionsmäßig erfaßbarer Flächen.

3.1. *Fräsen analytisch einfach beschreibbarer Flächen*

Die zeitliche Belastung der CNC-Steuerung tritt für diese Fräsproblematik in den Hintergrund. Das im Bild 6 dargestellte Teil, dessen Flächen an einem Holzmodell gefräst wurden, setzt sich bei Anwendung der Spiegelungsoperationen aus 5 Zylinderflächen, 1 Kegel- und 4 Torusflächen zusammen.
Durch Nutzung der softwaremäßigen Erweiterungen wurde für das NC-Steuerprogramm ein Datenumfang von etwa 5 Kbyte benötigt. Die Unterprogramme besitzen Allgemeingültigkeit und können im UP-Speicher der CNC-Steuerung abgelegt werden, so daß eine weitere Verdichtung der benötigten Informationen erzielt wird. Die Beschreibung solcher Flächen mit anderen mathematischen Beschreibungsformen wird somit hinfällig, und es ergeben sich nachstehende Vorteile:

- Unabhängigkeit von einem externen Rechner
- problemlose Erweiterungsfähigkeit durch Entwicklung weiterer Unterprogramme
- schnelle und einfache manuelle Programmierung möglich.

Quantitative Untersuchungen von Formelementen an Werkstücken in einem repräsentativen Betrieb des Formbaues für Konsumgüter ergaben, daß 80% aller auftretenden Formelemente auf analytisch einfach beschreibbaren Flächen basieren [3].

3.2. *Fräsen analytisch nicht einfach beschreibbarer Flächen*

Die Möglichkeiten der Fräserweggenerierung und der Korrekturen direkt in der Steuerung für komplizierte Formelemente, die auf verschiedenen mathematischen Flächenbeschreibungsmethoden beruhen, konnten ebenfalls erfolgreich getestet werden. Die Berechnungen sind gegenüber analytisch einfach beschreibbaren Flächen komplizierter und umfangreicher.
Die für diesen Fall geschaffenen softwaremäßigen Erweiterungen können sowohl in die manuelle als auch in die maschinelle Programmierung einbezogen werden. Die besonderen Vorteile liegen in einer erheblichen Datenreduzierung und somit in der Ausschaltung von Lese-, Stanzfehlern, der Beherrschung der Datenmengen und den direkten Korrekturen an der Maschine.

(Fortsetzung auf Seite 87)

L. Kollar[1])

Zur Lenkung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate und mathematische Modelle gelenkter Systeme

0. Einleitung

Der Entwurf einer Regeleinrichtung setzt notwendigerweise ausreichende Kenntnisse über das Verhalten der Regelstrecke hauptsächlich unter Betriebsbedingungen voraus. Auf der Grundlage dieser Kenntnisse wird ein mathematisches Modell der Regelstrecke ermittelt, und die Regeleinrichtung wird so dimensioniert, daß die Zielfunktionen der Regelung möglichst innerhalb eines großen Arbeitsbereichs der Regelstrecke erfüllt werden. Das gelingt um so besser, je treffender das mathematische Modell der Regelstrecke relevante Parameter des Betriebsregimes widerspiegelt. Diesbezügliche Untersuchungen zur Beschreibung des Lenkverhaltens mobiler landwirtschaftlicher Aggregate und die Ausstattung z. B. selbstfahrender Landmaschinen (Mähdrescher, Rübenerntemaschinen) und Traktoren mit automatischen Lenkeinrichtungen basieren auf der Voraussetzung des kräftefreien Abrollens starrer Reifen auf starrer Fahrbahn für masselose Aggregate bei Geschwindigkeiten um 6 km/h. Diese Voraussetzung ist für die großvolumigen Niederdruckreifen (z. B. 18–26 AS beim Radtraktor K-700, 18.4-34 AS beim Radtraktor ZT 303 und Mähdrescher) und den Eigenmassen der Aggregate von 6–13 t nicht mehr erfüllt.

Da auch die Arbeitsgeschwindigkeit 12 km/h erreichen kann und auf einer 10 ha großen Fläche von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte eine Fahrstrecke von 500 bis 800 km [1] zurückzulegen ist, erhält die Entlastung des Fahrers vom Lenkprozeß eine vordringliche Bedeutung. Darüber hinaus wird durch das automatische Lenken eine bessere Ausnutzung der konstruktiv gegebenen Arbeitsbreite bei gleichzeitiger Erhöhung der Arbeitsqualität erreicht. Diese Gründe sind u. a. seit langem Anlaß, das Lenken mobiler landwirtschaftlicher Aggregate auf Automaten zu übertragen.

Der Ermittlung die Praxis ausreichend widerspiegelnder mathematischer Modelle der Regelstrecke kommt gegenwärtig noch aus Gründen eines effektiven Einsatzes mikroelektronischer Schaltkreise für Reglerbaugruppen besondere Bedeutung zu, da hier möglichst mit einer Grundkonfiguration der Hardware alle Lenkeinrichtungen aufgebaut werden müßten.

1. Aufgabe einer automatischen Lenkung und sich daraus ergebende Bewegungsgrößen

Beim Lenken fahrender Landmaschinen kommt es darauf an, den Spuranschluß einzuhalten, damit die technologische Arbeitsbreite möglichst der konstruktiv gegebenen entspricht. Dabei soll die Fahrkursabweichung y_M (Bild 1) die agrotechnisch zulässigen Abweichungen nicht überschreiten. Dazu nimmt der Fahrer mit Hilfe seiner Sinnesorgane eine Vielzahl von Informationen über die Regelstrecke Aggregat – Boden auf, ermittelt die Fahrkursabweichung, um ihr durch entsprechende Stellsignale entgegenzuwirken.

Der Bewegungszustand eines fahrenden Aggregates wird somit in beabsichtigter Weise durch Lenken beeinflußt. Als Aggregat wird im folgenden nach TGL 80-22290 die Verbindung Arbeitsmaschine und Antriebsmaschine bezeichnet. Das Lenken umfaßt die Teilaufgaben [2]:

- Orten des fahrenden Aggregats hinsichtlich eines Bezugssystems
- Aufrechterhalten der Längsbewegung
- Erteilen einer Geschwindigkeit zur Fahrkursänderung
- Bewegungskontrolle hinsichtlich des Bezugssystems.

Dieser Prozeß, der bei allen fahrenden Aggregaten zu bewältigen ist, wird durch kinematische und kinetische Größen sowie von den jeweiligen Einsatzbedingungen bestimmt. Für landwirtschaftliche Aggregate sind das die Größen [3]:

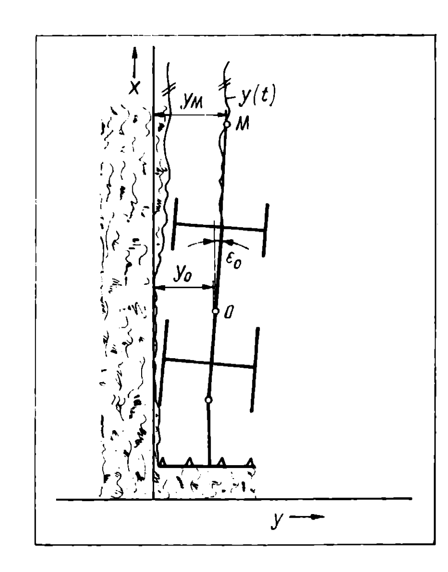


Bild 1. Mobiles Aggregat mit Regel- und Führungsgrößen

y_M; ε_0 Regelgrößen; $y(t)$ Führungsgröße

- Seitenkräfte S_i
- Antriebskräfte U_i
- Schräglaufwinkel α_i der elastischen Reifen
- seitliche Reifenverformung a
- Fahrgeschwindigkeit v_0
- Aggregatmasse m_0
- Trägheitsmoment J_T
- Koordinaten des Aggregatschwerpunkts sowie der Teilschwerpunkte der einzelnen Systemelemente.

2. Mechanische Eigenschaften des Systems Reifen – Boden

Der Reifen wirkt als Bindeglied zwischen Aggregat und Fahrbahn; er überträgt Kräfte und Momente auf die Fahrbahn. Beim Einwirken einer Seitenkraft S_i rollt ein Reifen unter einem Schräglaufwinkel α_i ab (Bild 2).

Die Größe des Schräglaufwinkels auf starrer Fahrbahn ist nach [4]

$$\alpha_i = \frac{S_i}{C_{Ai}} \quad (i = 1, 2, 3 \ldots) \tag{1}$$

mit der für jeden Reifen experimentell zu bestimmender Beziehung

$$C_{Ai} = \bar{c}G_i - c'G_i^2 \,. \tag{2}$$

$\bar{c}$, c' experimentell zu bestimmende Reifenbeiwerte; G_i Gewichtskraft im Punkt i

Da Seitenkräfte die Querbewegung eines Reifens verursachen und der Schräglaufwinkel die Bewegungsrichtung eines Reifens in der Fahrbahnebene bezüglich einer auf der Reifenachse stehenden Normalen angibt, muß, wenn dem Reifen eine Fahrkursänderung aufgeprägt werden soll, ein der Fahrkursänderung entsprechender Schräglaufwinkel wirksam sein. Erst wenn infolge des Schräglaufwinkels eine Seitenkraft

$$S_i = C_{Ai}\alpha_i \tag{3}$$

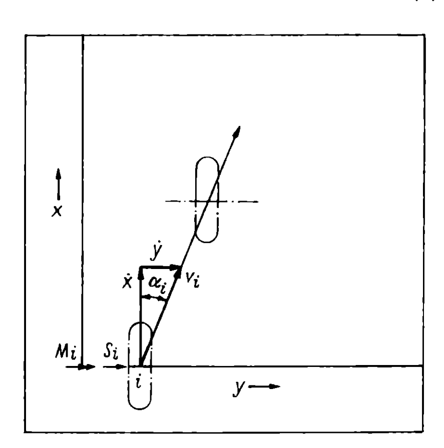


Bild 2. Belasteter Reifen und seine Bewegungsbahn

[1]) Dr.-Ing. *Ladislaus Kollar* (44) studierte bis 1961 an der IS für Landtechnik Friesack. Danach bis 1965 als Hauptmechaniker und Technischer Leiter der MTS Glewitz tätig. Von 1965 bis 1969 als Fachlehrer für Technische Mechanik an den IS Wismar und Wartenberg. Parallel dazu Fernstudium an der TU Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik bis 1970. Ab 1969 Lehrfachvertreter für das Lehrgebiet Automatisierungstechnik an der IHS Berlin-Wartenberg. 1976 Zusatzstudium an der Landwirtschaftlichen Hochschule Leningrad/UdSSR. 1976 Promotion A an der TU „Otto von Guericke" Magdeburg. 1979 Berufung zum Hochschuldozenten für Automatisierungstechnik. Seit 1980 Leiter der WB Automatisierung an der IHS Berlin-Wartenberg.

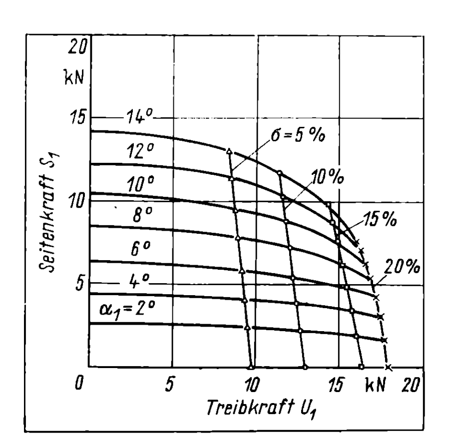


Bild 3. Reifenkennlinienfeld (Reifen 18-26 AS)
Fahrbahn: sandiger Lehm; Achslast $G_1 \approx$ ≈ 31 kN; Fahrgeschwindigkeit $v_0 \approx 9{,}8$ km/h; σ Treibradschlupf

entstanden ist, beginnt die Fahrkursänderung. Auf nachgiebigem Boden werden die übertragbaren Seitenkräfte stark von den Treibkräften und dem Radschlupf der Treibkräfte beeinflußt (Bild 3). Aus diesem Grunde ist es erforderlich, wie bereits von [5] vorgeschlagen, einen Treibkraftbeiwert C_U in (3) einzufügen, so daß für die Seitenkraft gilt:

$$S_i = (1 \pm C_U U_i)\, C_{Ai} \alpha_i \tag{4}$$

(+ für getriebene Reifen; — für treibende Reifen).

Damit wird dem Sachverhalt Rechnung getragen, daß bei größer werdenden Antriebskräften U_i die von einem Reifen übertragbaren Seitenkräfte kleiner werden. Hiermit ist auch das in der Praxis zu beobachtende schlechtere Reagieren eines Aggregats auf Lenkwinkeländerungen beim Übertragen großer Zugkräfte erklärt.

Die Wechselwirkungen zwischen Antriebskraft, Seitenkraft, Treibradschlupf und Schräglaufwinkel eines Reifens können aus dem Reifenkennlinienfeld (Bild 3) für einen Arbeitspunkt ermittelt werden und gestatten eine Beschreibung der Vorgänge bei Fahrkursänderungen. Der jeweilige Treibkraftbeiwert C_U ist aus dem Reifenkennlinienfeld zu entnehmen. Da es gegenwärtig noch keinen Katalog für Reifenkennlinienfelder gibt, sind diese experimentell zu ermitteln [3] und [5].

3. Arten der Lenkung und Bewegungsgleichungen

3.1. *Lenkungsarten*

Unter Beachtung der kinematischen Verhältnisse (Bild 4), die sich bei einer Lenkwinkeländerung einstellen, kann unterschieden werden zwischen

- Frontlenkung (Lenkung L1)
- Knicklenkung (Lenkung L2)
- Hecklenkung (Lenkung L3)
- Allradlenkung (Lenkung L4).

Bei der Bodenbearbeitung und Bestellung werden die Arbeitsgeräte an den Traktor angebaut, aufgesattelt oder angehängt. Durch Verstellen der Lenkeinrichtung wird der Arbeitsbreitenanschluß gesichert. Zur Ermittlung eines mathematischen Modells werden die bei der Analyse des Lenkvorgangs an Kraftfahrzeugen getroffenen Vereinfachungen unterstellt [4]. Sie gelten auch für mobile landwirtschaftliche Aggregate unter Beachtung der unter Abschn. 2. angegebenen Ergebnisse [3]. Im einzelnen wird angenommen (Bild 5):

- alle äußeren Kräfte und die Trägheitskräfte wirken in der Ebene des Schwerpunktes parallel zur nichtgeneigten Fahrbahn
- die Schräglaufwinkel liegen im Bereich $0 < \alpha_i < 0{,}17$ rad

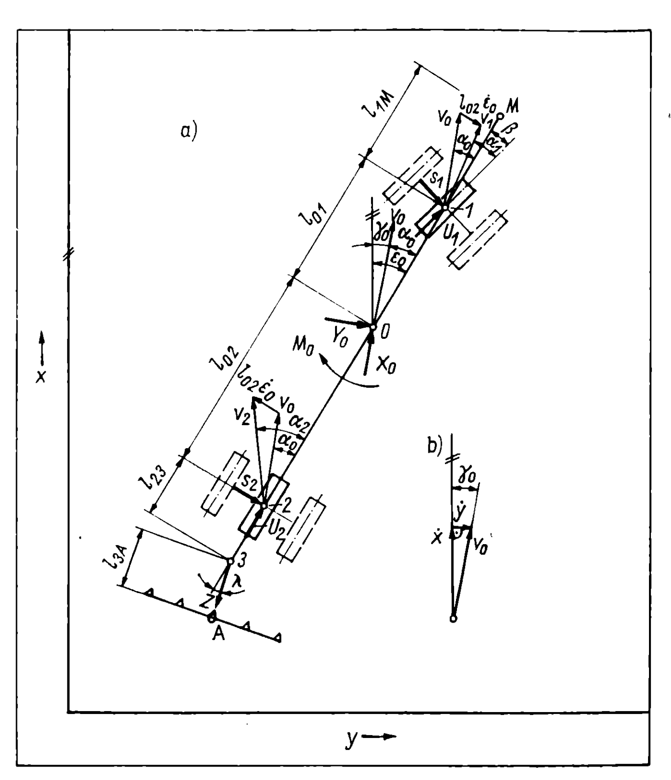


Bild 5. Ersatzmodell für ein mobiles Aggregat
a) Bezugssystem und Betriebs- sowie Konstruktionsgrößen;
b) Geschwindigkeiten der Schwerpunktbahn

- die von Anhänge- oder Aufsattelgeräten ausgehenden Kräfte werden durch ein reibungsfreies Gelenk übertragen
- die beiden Räder einer Achse werden durch ein fiktives Doppelrad in Achsmitte ersetzt
- die Fahrkursabweichung y_M wird durch einen Meßfühler M, der in Verlängerung der Aggregatlängsachse angebracht ist, erfaßt.

3.2. *Bewegungsgleichungen*

3.2.1. Schräglaufwinkel

Das durch die Antriebskräfte U_1 und U_2 angetriebene und durch die Seitenkräfte S_1 und S_2 geführte Aggregat bewegt sich mit der Geschwindigkeit v_0 sowie mit dem Gierwinkel ε_0 zum Bezugssystem (Bild 5). Infolge der Überlagerung von Translation und Rotation entstehen die Schräglaufwinkel:

$$\alpha_1 = \alpha_0 + l_{01} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0}, \tag{5a}$$

$$\alpha_2 = \alpha_0 + l_{02} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0}. \tag{6a}$$

Da für das automatische Lenken der Zusammenhang zwischen der Fahrkursabweichung y_M oder Gierwinkel ε_0 und dem Lenkwinkel β im Sinne einer automatischen Steuerung erforderlich ist, muß α_0 aus (5a) und (6a) eliminiert werden.
Es gilt (Bild 5)

$$\alpha_0 = \varepsilon_0 - \gamma_0 \tag{7a}$$

sowie

$$\sin \gamma_0 = \frac{\dot{y}_0}{v_0}. \tag{8a}$$

Lenkung	Vorderachslenkung (1)	Knicklenkung (2)	Hecklenkung (3)	Allradlenkung (4)
Ersatzmodell	l_{01}, 1, 0, l_{02}, 2	l_{01}, 1, 0, l_{02}, 2	l_{01}, 1, 0, l_{02}, 2	l_{01}, 1, 0, l_{02}, 2
Schräglaufwinkel	$\alpha_1 = \alpha_0 - l_{01} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} + \beta$ $\alpha_2 = \alpha_0 + l_{02} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0}$	$\alpha_1 = \alpha_0 - l_{01} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0}$ $\alpha_2 = \alpha_0 + l_{02} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} - \beta$	$\alpha_1 = \alpha_0 + \beta - l_{01} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0}$ $\alpha_2 = \alpha_0 + l_{02} + \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} - \beta$	$\alpha_1 = \alpha_0 - l_{01} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} + \beta$ $\alpha_2 = \alpha_0 + l_{02} \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} - \beta$

Bild 4. Kinematische Größen der Lenkungsarten

Beim automatischen Lenken entstehen nur kleine Fahrtrichtungsänderungen, weil die Bearbeitung der Flächen möglichst gradlinig ausgeführt wird, so daß anstelle des Sinus von Winkeln das Argument und für den Kosinus 1 gesetzt werden kann. Damit folgt aus (7a) und (8a):

$$\gamma_0 \approx \frac{\dot{y}_0}{v_0} \tag{8b}$$

$$\alpha_0 = \varepsilon_0 - \frac{\dot{y}_0}{v_0}\,. \tag{7b}$$

Mit der auf den Schwerpunkt des Aggregats reduzierten Fahrkursabweichung (Bild 5)

$$y_0 = y_{\mathrm{M}} - \varepsilon_0(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) \tag{9a}$$

und ihrer Differentiation nach der Zeit ergibt sich

$$\dot{y}_0 = \dot{y}_{\mathrm{M}} - \dot{\varepsilon}_0(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) \tag{9b}$$

$$\ddot{y}_0 = \ddot{y}_{\mathrm{M}} - \ddot{\varepsilon}(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})\,. \tag{9c}$$

Mit (9b) ergibt sich aus (5a), (6a) und (7b) für die Schräglaufwinkel:

$$\alpha_1 = \varepsilon_0 - \frac{1}{v_0}\,[\dot{y}_{\mathrm{M}} - \dot{\varepsilon}_0(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})] - l_{01}\frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} + \beta \tag{5b}$$

$$\alpha_2 = \varepsilon_0 - \frac{1}{v_0}\,[\dot{y}_{\mathrm{M}} - \dot{\varepsilon}_0(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})] + l_{02}\frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0}\,. \tag{6b}$$

3.2.2. Kinetische Beziehungen

In Richtung der Fahrgeschwindigkeit wirken die Antriebskräfte und ihr entgegen die Zugkraft (Bild 5). Da die Geschwindigkeit bei der Arbeit mit Aggregaten während einer Arbeitsetappe konstant ist, kann die Gleichgewichtsbedingung

$$m_0\dot{v}_0 = \text{konst.} \tag{10a}$$

unberücksichtigt bleiben.

Senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor v_0 gilt:

$$m_0 v_0 \dot{\gamma}_0 = S_1(\alpha_1)\cos(\alpha_0 + \beta) + U_1 \sin(\alpha_0 + \beta) + Y_0 + S_2(\alpha_2)\cos\alpha_0 + U_2 \sin\alpha_0 - Z\sin(\alpha_0 - \lambda)\,. \tag{11a}$$

Das Moment der äußeren Kräfte um den Schwerpunkt ergibt:

$$J_{\mathrm{T}}\ddot{\varepsilon}_0 = S_1(\alpha_1)\,l_{01}\cos(\alpha_0 + \beta) + U_1 l_{01}\sin(\alpha_0 + \beta) + M_0 - S_2(\alpha_2)\,l_{02} - Z(l_{01} + l_{23})\,\lambda\,. \tag{12a}$$

Werden die Seitenkräfte S_1 und S_2 in (11a) und (12a) nach (3) sowie $\dot{\gamma}_0$ nach (8b) in Verbindung mit (9c) ersetzt und so geordnet, daß die Ausgangsgrößen links und die Eingangsgrößen rechts vom Gleichheitszeichen stehen, ergibt sich nach einigem Umformen:

$$m_0\ddot{y}_{\mathrm{M}} + (C_1 + C_2)\frac{\dot{y}_{\mathrm{M}}}{v_0} - m_0(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})\,\ddot{\varepsilon}_0 - [(C_1 + C_2)\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) - C_1 l_{01} + C_2 l_{02}] \times \frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} - (C_1 + C_2)\,\varepsilon_0 = (C_1 + U_1)\,\beta + Z\lambda + Y_0 \tag{11b}$$

$$(C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\frac{\dot{y}_{\mathrm{M}}}{v_0} + J_{\mathrm{T}}\ddot{\varepsilon}_0 - [(C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) - C_1 l_{01}^2 - C_2 l_{02}^2]\frac{\dot{\varepsilon}_0}{v_0} - (C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\,\varepsilon_0 = (C_1 + U_1)\,l_{01}\beta - Z(l_{01} + l_{23})\,\lambda + M_0\,. \tag{12b}$$

Wird anstelle der Konstruktions- und Betriebsparameter eine allgemeine Form der Koeffizienten gesetzt, folgt aus (11b) und (12b):

$$A_0\ddot{y}_{\mathrm{M}} + A_1\dot{y}_{\mathrm{M}} - A_2\ddot{\varepsilon}_0 - A_3\dot{\varepsilon}_0 - A_4\varepsilon_0 = A_7\beta + A_8\beta + A_9 \tag{11c}$$

$$B_1\dot{y}_{\mathrm{M}} - B_2\ddot{\varepsilon}_0 - B_3\dot{\varepsilon}_0 - B_4\varepsilon_0 = B_6\beta - B_7\lambda + B_8\,. \tag{12c}$$

Mit den Koeffizienten

$A_0 = m_0$ $\qquad B_1 = (C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\frac{1}{v_0}$

$A_1 = (C_1 + C_2)\frac{1}{v_0}$ $\qquad B_2 = J_{\mathrm{T}}$

$A_2 = m_0(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})$ $\qquad B_3 = [(C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) - C_1 l_{01}^2 - C_2 l_{02}^2]\frac{1}{v_0}$

$A_3 = [(C_1 + C_2)\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) - C_1 l_{01} + C_2 l_{02}]\frac{1}{v_0}$

$A_4 = C_1 + C_2$ $\qquad B_4 = (C_1 l_{01} - C_2 l_{02})$

$A_7 = C_1 + U_1$ $\qquad B_6 = (C_1 + U_1)\,l_{01}$

$A_8 = Z$ $\qquad B_7 = Z(l_{01} + l_{23})$

$A_9 = Y$ $\qquad B_8 = M_0\,.$

Tafel. Koeffizienten des DGL-Systems (13)

c, *d* geometrische Größen infolge Auslenkung des Aggregatschwerpunktes bei Lenkwinkeländerung [3]

Koeffizient	Lenkungsart: Frontlenkung (*L*1)	Knicklenkung (*L*2)	Hecklenkung (*L*3)	Allradlenkung (*L*4)
A_0		m_0		
A_1		$(C_1 + C_2)\frac{1}{v_0}$		
A_2		$m_0\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})$		
A_3		$[(C_1 + C_2)\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) - C_1 l_{01} + C_2 l_{02}]\frac{1}{v_0}$		
A_4		$C_1 + C_2$		
A_5	0	$m_0 c\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})$	0	0
A_6	0	$(C_1 c + C_2 d)\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})\frac{1}{v_0}$	0	0
A_7	$C_1 + U_1$	$(C_1 + U_1)\,c - (C_2 + U_2 + Z)\,d$	$C_2 + U_2$	$C_2 + U_2$
A_8		Z		
A_9		Y_0		
B_1		$(C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\frac{1}{v_0}$		
B_2		J_{T}		
B_3		$(C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}}) - C_1 l_{01}^2 - C_2 l_{02}^2\,\frac{1}{v_0}$		
B_4		$C_1 l_{01} - C_2 l_{02}$		
B_5		$(C_1 + U_1)\,c l_{01} + (C_2 + U_2)\,d l_{02} - Z\,(l_{02} + l_{23})\,d$		
B_6	$(C_1 + U_1)\,l_{01}$	$[(C_1 l_{01} - C_2 l_{02})\,(l_{01} + l_{1\mathrm{M}})\,c]\frac{1}{v_0}$	$(C_2 + U_2)\,l_{02}$	$(C_2 + U_2)\,l_{02}$
B_7		$Z\,(l_{02} + l_{23})$		
B_8		M_0		

4. Übertragungsfunktionen

Werden (11c) und (12c) in den Bildbereich transformiert, ergibt sich:

$$y_{\mathrm{M}}(A_0p^2 + A_1p) + \varepsilon_0(-A_2p^2 - A_3p - A_4) = \beta A_7(p) + \lambda A_8(p) + A_9(p)$$

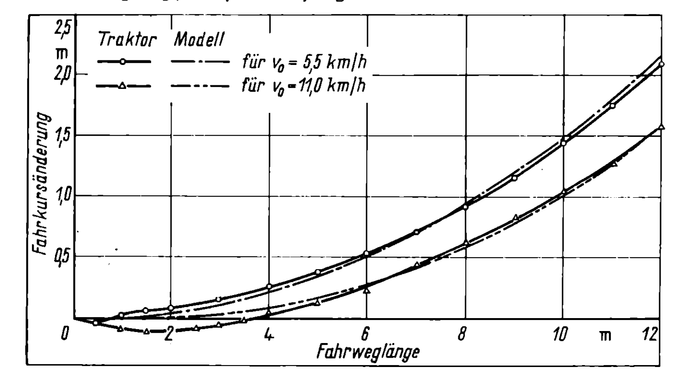
$$y_{\mathrm{M}}(B_1p) + \varepsilon_0(-B_2p^2 - B_3p - B_4) = \beta B_6(p) - \lambda B_7(p) + B_8(p)\,. \tag{13}$$

Dieses Gleichungssystem ermöglicht es, Änderungen der Führungsgrößen y_{M} und ε_0 sowie Auswirkungen des Lenkwinkels β einschließlich der äußeren Störgrößen zu untersuchen. Der Gültigkeitsbereich von (13) wurde unter praktischen Verhältnissen bestätigt (Bild 6).

Dieses Gleichungssystem gilt auch für Traktoren mit den oben genannten Lenkungsarten (Bild 4). Die Koeffizienten der linken Seite des Gleichungssystems sind für alle angegebenen Lenkungsarten gleich. Die Koeffizienten der rechten Seite des Glei-

Bild 6. Sprungantwortfunktionen [3]

Lenkwinkelsprung $\beta = 0{,}0872$ rad; Zugkraft $Z = 16$ kN



chungssystems haben entsprechend der Wirksamkeit des Lenkwinkels zum Teil andere Strukturen und führen auch zu einer Erhöhung der Ordnung des Gleichungssystems bei der Knicklenkung, so daß hier auf der rechten Seite von (13) nicht nur der Lenkwinkel β, sondern auch dessen 1. und 2. Ableitung multipliziert mit dem Koeffizienten B_5 bzw. B_6 auftreten.
Aus dem Gleichungssystem (13) lassen sich ohne großen Aufwand die Übertragungsfunktionen für die Änderung der Führungsgrößen

$$G_\beta(p) = \frac{y(p)}{\beta(p)} = \frac{D_\beta}{D} \tag{14a}$$

$$G_\varepsilon(p) = \frac{\varepsilon_0(p)}{\beta(p)} = \frac{(D_\beta)\,\varepsilon_0}{D} \tag{14b}$$

und die Wirkung der Störgrößen

$$G_Y(p) = \frac{y(p)}{Y_0(p)} = \frac{D_Y}{D} \tag{15a}$$

$$G_M(p) = \frac{y(p)}{M_0(p)} = \frac{D_M}{D} \tag{15b}$$

$$G_\lambda(p) = \frac{y(p)}{\lambda(p)} = \frac{D_\lambda}{D} \tag{15c}$$

ermitteln, wenn die Determinanten entsprechend (14a), (14b) und (15a bis 15c) ermittelt werden.
Für einen Traktor mit den Konstruktionsdaten des K-700 [6] z. B. ergibt sich die Übertragungsfunktion zu

$$G_\beta(p) = \frac{y(p)}{\beta(p)} =$$

$$= \frac{K_I}{p^2} \cdot \frac{0{,}052\,p^4 s^4 + 0{,}643\,p^3 s^3 + 0{,}661\,p^2 s^2 + 1{,}67\,ps + 1}{0{,}073\,p^2 s^2 + 0{,}698\,ps + 1}$$

Zusammenfassung

Die bisherigen Annahmen zum Aufstellen von Ersatzmodellen für die Beschreibung des Lenkvorganges sind zu stark vereinfacht, da sie nicht die Größen enthalten, die die Aggregatbewegung verursachen.
Die Fahrkursabweichung hängt von mehreren Größen vom Aggregat und von der Fahrbahn ab. Die Wechselwirkungen dieser Einflußgrößen, insbesondere die Kraftübertragung zwischen elastischem Reifen und nachgiebigem Boden, lassen sich gegenwärtig nicht befriedigend beschreiben. Sie schließen aufgrund einer fehlenden Theorie der Kraftübertragung Reifen — Boden eine theoretische Prozeßanalyse aus, so daß eine experimentelle Ermittlung der Kennwerte zur Beschreibung des fahrdynamischen Verhaltens erforderlich ist, um wichtige Wechselwirkungen zwischen Reifen und Boden in Form des Reifenkennlinienfelds zu erfassen. Auf deren Grundlage ist unter Beachtung kinematischer und kinetischer Beziehungen ein Gleichungssystem aufstellbar, das die Systemeigenschaften mobiler Aggregate beim Lenken beschreibt. Die angeführte Vorgehensweise bietet eine handhabbare Grundlage für die Dimensionierung von Lenkeinrichtungen aus Konstruktionsdaten der Aggregate.

Literatur

[1] *Göhlich, H.:* Der mobile Arbeitsplatz — menschengerecht gestaltet. VDI-Berichte Nr. 407. Düsseldorf: VDI-Verlag 1981.
[2] *Kollar, L.:* Automatisierung in der Landwirtschaft. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
[3] *Kollar, L.:* Beitrag zur Automatisierung der Lenkung zweigliedriger allradangetriebener Aggregate auf nachgiebigem Boden. Dissertation A, TH Magdeburg 1976.
[4] *Jante, A.:* Die Grundlagen der Fahrstabilität. AdW Berlin, 1963, Nr. 4. Klasse für Mathematik, Physik und Technik.
[5] *Krick, G.:* Die Wechselbeziehungen zwischen starrem Rad, Luftreifen und nachgiebigem Boden. Dissertation A, TU München 1971.
[6] Bedienungsanleitung für den Zugtraktor ZT 303. VEB Traktorenwerk Schönebeck/Elbe 1972.

msr 8006

G. Schmidt; G. Lappus[1])

Verfahren der Echtzeitsimulation, Netzzustandsbeobachtung und prädiktiven Steuerung bei der Prozeßführung von Erdgasverteilungsnetzen

0. Einleitung

Konzipierung, Aufbau und Betrieb moderner, rechnergestützter Führungssysteme für räumlich weit ausgedehnte und häufig stark vermaschte Ver- und Entsorgungsnetze stellen hohe Anforderungen an Geräte und Verfahren der Prozeßautomatisierung. Im Beitrag wird über ausgewählte Ergebnisse theoretischer und praktischer Untersuchungen berichtet, die im Zusammenhang mit der Entwicklung und Einführung neuer Prozeßführungssysteme für den Betrieb von Erdgastransportsystemen und -verteilungsnetzen am Laboratorium der Verfasser erarbeitet wurden. Von der Struktur eines modernen Gasnetzführungssystems und dessen grundsätzlichen Aufgaben ausgehend werden drei Problemkreise detaillierter behandelt:

- bereits seit längerer Zeit bewährte Prozeßführungshilfen, z. B. verschiedene Formen der *Prozeßsimulation*
- in der Einführung befindliche Hilfsmittel, wie etwa eine umfassende dynamische *Netzzustandsbeobachtung*
- zukünftige Möglichkeiten der *automatischen Netzsteuerung*, die auf Funktionen der zuvor genannten Prozeßführungshilfen aufbauen.

---

[1]) Prof. Dr.-Ing. *Günther Schmidt* (48) studierte von 1955 bis 1960 Elektrotechnik mit den Schwerpunkten Regelungstechnik und Nachrichtentechnik an der TH Darmstadt/BRD. Von 1960 bis 1966 wissenschaftlicher Assistent und Lehrbeauftragter am Institut für Regelungstechnik dieser Hochschule. 1966 Promotion auf dem Gebiet der Elektrotechnik. Im Jahre 1967 Gastwissenschaftler im Division of Engineering Mechanics, Stanford University, Californien/USA. Von 1968 bis 1971 bei der Fa. Dornier GmbH, Friedrichshafen/BRD, tätig. Seit 1972 ordentlicher Professor mit Lehrstuhl und Laboratorium für Steuerungs- und Regelungstechnik an der TU München.

Dipl.-Ing. *Gerhard Lappus* (31) studierte von 1972 bis 1977 Elektrotechnik mit Schwerpunkt Regelungs- und Prozeßtechnik an der TU München. Seit 1977 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Laboratorium für Steuerungs- und Regelungstechnik der TU München.

1. Struktur und Aufgaben eines modernen Gasnetzführungssystems

Transport und Verteilung von Erdgas erfolgen mit Hilfe langer, verzweigter Rohrleitungssysteme und ausgedehnter, vermaschter Rohrleitungsnetze, wobei in der Regel Kompressoren die für die Gasfortleitung benötigte Energie liefern. Die generelle Aufgabe der Gasnetzführung ist es, einen Beitrag zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb dieser Transport- bzw. Verteilungsprozesse zu leisten. Ohne auf die bereits in der Projektierungsphase eines Gasrohrnetzes zu beachtenden Netzführungsaspekte einzugehen (siehe z. B. [1]), seien einige hier wesentliche Aufgabenstellungen der Netzführung in der eigentlichen Betriebsphase genannt, wie etwa

- die laufende Überwachung der Rohrnetzanlage und der zugehörigen Meßeinrichtungen im Hinblick auf Anlagenstörungen, -schäden und Fehlfunktionen
- die laufende Überwachung der Gasdrücke und Gasflüsse im gesamten Netz und an seinen Rändern im Hinblick auf die Einhaltung aller vorgegebener technischer, vertraglicher und wirtschaftlicher Grenzwerte
- und schließlich, bedingt durch die Prozeßdynamik, die wiederholte Prädiktion der jeweils zukünftig zu erwartenden Gasströmungsvorgänge im Hinblick auf eine vorausschauende Grenzwertüberwachung und Ermittlung der momentan und zukünftig notwendigen und zweckmäßigen Netzsteuerungsmaßnahmen.

Bild 1 zeigt die unter dem Gesichtspunkt „Verfahren der Prozeßautomatisierung" wesentlichen Elemente eines modernen Gasnetzführungssystems sowie deren informationsmäßige Verknüpfung. Wirkungsweise und Zusammenspiel der hier im Mittelpunkt stehenden Funktionsblöcke zur prädiktiven Simulation, zur Netzzustandsbeobachtung und zur (manuellen oder automatischen) iterativen Entwicklung günstiger, möglicherweise auch optimaler Steuerstrategien werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

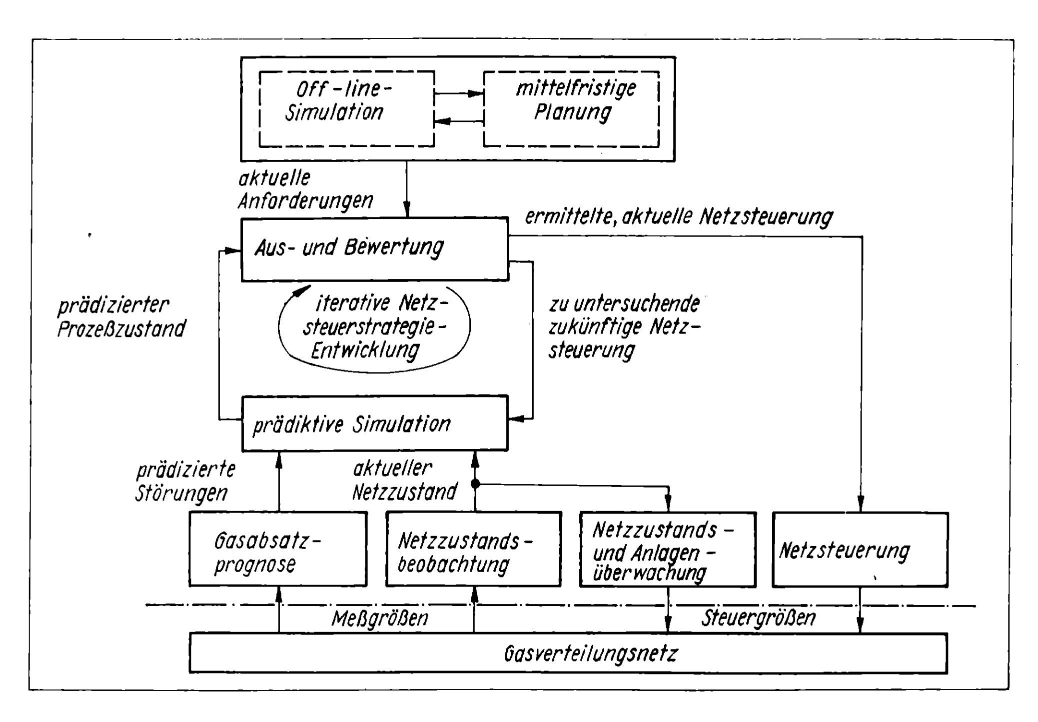


Bild 1. Struktur eines modernen Gasnetzführungs- und -überwachungssystems

2. Modellierung und Simulation der Prozeßdynamik

Bild 1 läßt die hohe Bedeutung erkennen, die ädaquaten Prozeßmodellen und verschiedenen Formen der Prozeßsimulation im Rahmen eines Gasnetzführungssystems zukommt. Im Zusammenhang mit Netzführungsaufgaben ist dabei zu beachten, daß sowohl Prozeßmodell als auch Prozeßsimulation für den On-line- (= prozeßgekoppelten) Einsatz in Echtzeit ausgelegt sein müssen.

Im Rahmen umfassender theoretischer und experimenteller Untersuchungen (siehe z. B. [2] und [3]) konnte gezeigt werden, daß das mathematische Prozeßmodell eines Gasverteilungsnetzes aus dynamischen Teilmodellen für die Strömungsvorgänge in den einzelnen Rohrleitungen und aus statischen Teilmodellen für die sonstigen Netzelemente, wie Druck- und Flußregler, Schieber und geregelte Kompressorstationen, modular zusammengesetzt werden kann.

Für normale Betriebsbedingungen kann in einem Rohr der Länge L eine isotherme, kompressible, eindimensionale Strömung angenommen werden, die durch die nichtlinearen partiellen Zustandsdifferentialgleichungen für den Druck $p(z, t)$ und Massenfluß $q(z, t)$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial p(z,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial q(z,t)}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(p) \cdot \frac{\partial q(z,t)}{\partial z} \\ a_2(p) \cdot \frac{q \cdot |q|}{p} + a_3(p) \cdot p + a_4 \frac{\partial p(z,t)}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{1}$$

oder kompakter in vektorieller Schreibweise durch

$$x_t(z, t) = f_z(x(z, t)) \tag{2}$$

$$\text{mit } x_t(z, t) = [\partial p(z, t)/\partial t \quad \partial q(z, t)/\partial t]^T$$

beschrieben wird. In diesen Beziehungen bedeuten $z \in (0, L)$ die Ortsvariable und $t \in (t_0, \infty)$ die Zeit; a_1 bis a_4 sind von den physikalischen Eigenschaften des Gases, der Rohrleitungsgeometrie und teilweise auch vom Druck p abhängige Parameter. Randwerte bei $z = \{0; L\}$ folgen aus eingeprägten zeitvariablen Drücken oder Flüssen und/oder aus den zwischen den Teilsystemen geltenden Kopplungsbedingungen. Anfangswerte werden gemäß der in (2) gewählten Schreibweise durch die vektorwertige Anfangsfunktion

$$x(z, t_0) = x^0(z) \tag{3}$$

festgelegt.

Im Vergleich zu den langen Rohrleitungen dürfen räumliche Ausdehnung und dynamische Eigenschaften aller anderen Netzelemente vernachlässigt werden. Sie werden durch nichtlineare algebraische Gleichungen der Form

$$h(p_{e1}, p_{e2}, q_e, u_e) = 0 \tag{4a}$$

modellmäßig beschrieben. p_{e1} und p_{e2} sind der elementbezogene Eingangs- bzw. Ausgangsdruck, q_e ist der Elementdurchfluß und u_e eine Steuervariable. Aufgrund technischer Gegebenheiten wird (4a) in der Regel durch elementbezogene Ungleichungsnebenbedingungen der Form

$$\left.\begin{aligned} p_{e1,\min} &\leqq p_{e1} \leqq p_{e1,\max} \\ p_{e2,\min} &\leqq p_{e2} \leqq p_{e2,\max} \\ q_{e,\min} &\leqq q_e \leqq q_{e,\max} \end{aligned}\right\} \tag{4b}$$

ergänzt. Am Rande sei hier angemerkt, daß sich bei Wirksamwerden der Beschränkungen (4b) die Randbedingungen der Modellgleichungen für die angrenzenden Rohrleitungen strukturell verändern können.

Die digitale Simulation der Prozeßdynamik erfordert eine i. allg. simultane Lösung aller Teilmodellgleichungen, die, der Netztopologie entsprechend zusammengefügt, das Gesamt-Prozeßmodell bilden. Hierzu wurde ein Lösungsalgorithmus entwickelt, der speziell für On-line-Einsätze auf Prozeßrechnern mit beschränkter arithmetischer Genauigkeit ausgelegt ist [2]. Die Modellgleichungen werden unter Einarbeitung der Kopplungs- und Randbedingungen mit Hilfe eines modifizierten Crank-Nicholson-Verfahrens diskretisiert; das resultierende nichtlineare implizite Gleichungssystem hoher Dimension wird unter Anwendung von Sparse-Matrix-Techniken iterativ mit dem Newton-Raphson-Verfahren gelöst. Für Netze mittlerer Größe beträgt die Dimension eines solchen Gleichungssystems 200 bis 500.

Das hier beschriebene Prozeßmodell und die zugehörigen numerischen Lösungsverfahren bilden die Grundlage des allgemeinen Gasnetzsimulationsprogrammes GANESI [3], dessen Eignung und Nutzen für On-line-Netzführungsaufgaben in gezielten Validierungsexperimenten und in zahlreichen industriellen Einsätzen nachgewiesen wurde. Seine einfache Bedienbarkeit, die für den Anwendungszweck angemessene Genauigkeit und die für den Echtzeiteinsatz notwendige kurze Rechenzeit erweisen sich als seine hervorstechenden Merkmale.

Die Bedeutung der Prozeßmodellierung und -simulation als Verfahren zur Führung von Erdgasverteilungsnetzen zeigt sich neben den hier ausgeklammerten reinen Off-line-Anwendungen, z. B. für Zwecke der Netzprojektierung und Schulung des Bedienpersonals, in den im Bild 1 skizzierten Funktionen. Einerseits benötigt man ein geeignetes Prozeßmodell zur Netzzustandsbeobachtung, die verallgemeinert und sehr anschaulich auch als *Prozeßbegleitende Simulation* bezeichnet werden kann. Andererseits ist die Simulation des Prozeßverhaltens zur Vorhersage des jeweils zukünftigen Netzzustandes (*Prädiktive Simulation*) und zur hierarchisch übergeordneten, mittelfristigen Planung geeigneter Netzsteuerstrategien (*Planungs-Simulation*) erforderlich. Auf diese Funktionen soll in den nächsten Abschnitten noch näher eingegangen werden.

3. Netzzustandsbeobachtung

Die informationsmäßige Verknüpfung der Elemente des im Bild 1 dargestellten Netzführungssystems zeigt, daß sowohl für eine umfassende Prozeßüberwachung als auch für eine modellgestützte, prädiktive Prozeßführung der jeweils aktuelle Gesamtnetzzustand bekannt sein muß. Da eine hinreichend voll-

ständige direkte Messung des Strömungszustandes wirtschaftlich nicht vertretbar ist, muß ein Verfahren zur algorithmischen, modellgestützten Meßwertermittlung eingesetzt werden. Zur Lösung dieser Aufgabe wurde ein Netzzustandsbeobachtersystem entwickelt und realisiert [4] und [5], dessen Funktion nachfolgend skizziert wird. Auf alternative Verfahren zur Ermittlung des Strömungszustandes in Gasverteilungsnetzen, so z. B. auf der Grundlage von Ausgleichsrechnung [6], Kalman-Filter [7], Parallel-Simulation [8], wird hier nicht eingegangen, da Vergleiche gezeigt haben, daß unter praxisrelevanten Gesichtspunkten ein Zustandsbeobachtersystem eine Reihe von Vorteilen gegenüber diesen Alternativen aufweist.

Wendet man das ursprünglich von *Luenberger* beschriebene Verfahren der Zustandsbeobachtung [9] in entsprechend erweiterter Form auf Gasverteilungsnetze an, so kann man für die Rekonstruktion des gesamten orts- und zeitveränderlichen Strömungszustandes im Netz ein Beobachtersystem entwerfen, das, dem modular aufgebauten Prozeßmodell entsprechend, aus verkoppelten Teilsystembeobachtern besteht. Hierbei ist vorauszusetzen, daß der Prozeßzustand mit den verfügbaren Meßwerten von diskreten Punkten des Netzes aus beobachtbar ist, was aber für typische Gasverteilungsnetze in der Regel zutrifft [4].

Für ein Teilmodell nach (2) mit den hier beispielhaft angenommenen Randwerten

$$q(0, t) = q_1(t), \quad q(L, t) = q_2(t) \tag{5}$$

und m punktförmigen Druckmeßwerten

$$y_j(t) = p(z_j, t), \quad 0 \leqq z_j \leqq L, \quad j = 1, 2, \ldots, m\,, \tag{6}$$

die zusammen den Meßvektor $\boldsymbol{y}(t)$ bilden, kann für ein einzelnes Rohr folgender Teilbeobachter definiert werden:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_t(z, t) = \boldsymbol{f}_z(\hat{\boldsymbol{x}}(z, t)) + \boldsymbol{G}(z) \cdot (\boldsymbol{y}(t) - \hat{\boldsymbol{y}}(t))\,, \tag{7a}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(z, t_0) = \hat{\boldsymbol{x}}^0(z)\,, \tag{7b}$$

$$\hat{q}(0, t) = q_1(t), \quad q(L, t) = q_2(t)\,. \tag{7c}$$

Der Beobachterzustand $\hat{\boldsymbol{x}}(z, t)$ und der Vektor $\hat{\boldsymbol{y}}(t)$ sind die zu $\boldsymbol{x}(z, t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ entsprechenden Größen. Der Beobachteranfangszustand $\hat{\boldsymbol{x}}^0(z)$ sei beliebig, aber physikalisch sinnvoll gewählt. Die Elemente der $2 \times m$—Matrix $\boldsymbol{G}(z)$ sind ortsabhängige Gewichtungen für die einzelnen Korrekturterme $(y_j - \hat{y}_j)$. Diese Gewichtungen werden so gewählt, daß der Beobachtungsfehler asymptotisch gegen Null strebt, also

$$\lim_{t\to\infty} \tilde{\boldsymbol{x}}(z, t) = \lim_{t\to\infty} [\boldsymbol{x}(z, t) - \hat{\boldsymbol{x}}(z, t)] = \boldsymbol{0}\,. \tag{8}$$

Im Hinblick auf den Einsatz des Beobachters im Rahmen eines industriellen Netzführungssystems ist jedoch zu beachten, daß sich diese (theoretische) Forderung niemals exakt erfüllen läßt, da stets gewisse Prozeßmodellierungs- und Meßwertungenauigkeiten vorliegen. Typische Fehler im Zusammenhang mit Gasverteilungsnetzen sind zeitlich konstante Modellparameterfehler und nullpunkts-verjustierte Meßwerte (bias) sowie zeitveränderliche Meßwertstörungen und Meßwertausfälle, die infolge der großen örtlichen Netzausdehnung und der dadurch notwendigen Datenfernübertragung relativ häufig auftreten. Zum Entwurf des Beobachtersystems ist es daher günstig, die Forderung (8) abzuschwächen in

$$|\tilde{x}_i(z, t)| < \varepsilon_i(z) \ \text{für}\ t > t_E; \quad i = 1, 2; \quad \varepsilon_i(z) > 0 \tag{9}$$

und zwei Phasen der Zustandsrekonstruktion zu unterscheiden:

- In der sog. *Einschwingphase*, d. h. für den Zeitraum $t_0 \leqq t \leqq t_E$, muß der rekonstruierte Zustand $\hat{\boldsymbol{x}}(z, t)$ in die Nähe des realen Zustandes $\boldsymbol{x}(z, t)$ hin konvergieren. Üblicherweise ist eine kurze Einschwingzeit $(t_E - t_0)$ wünschenswert, für die hier betrachteten Anwendungsfälle ist sie jedoch relativ unkritisch.
- In der *Folgephase*, d. h. für $t > t_E$, muß der rekonstruierte Zustand dem realen Prozeßzustand möglichst exakt nachgeführt werden, die Fehlerschranken $\varepsilon_i(z)$ können als Maß zur Beurteilung der Güte der Zustandsbeobachtung herangezogen werden. In dieser Phase ist insbesondere der Einfluß der o. g. Meß- und Modellierungsfehler von Bedeutung.

Dieser Einteilung entsprechend wird für jede Phase eine spezielle Beobachtergewichtungsmatrix $\boldsymbol{G}(z)$ entworfen. Durch Umschalten von $\boldsymbol{G}_E(z)$ zu $\boldsymbol{G}_F(z)$ zur Zeit t_E kann somit der Beobachter an die in beiden Phasen unterschiedlichen Anforderungen gezielt angepaßt werden. Der a priori unbekannte Umschaltzeitpunkt kann durch Auswerten des rechentechnisch verfügbaren Terms $\tilde{\boldsymbol{y}}(t) = \boldsymbol{y}(t) - \hat{\boldsymbol{y}}(t)$ abgeschätzt werden.

Ohne hier näher auf den Entwurf geeigneter Beobachtergewichtungen einzugehen, was genauer in [4] und [5] beschrieben wird, sei hier erwähnt, daß linear vom Ort abhängige Gewichtungsfunktionen in der Einschwingphase und punktuelle Gewichtungen in der Folgephase zu guten Rekonstruktionsergebnissen führen. Darüber hinaus ist es notwendig, spezielle „Meßwertausfallmaßnahmen" in das Beobachterkonzept mit einzubeziehen. Diese umfassen u. a. eine jeweils an die Fehlersituation angepaßte Aufteilung der verfügbaren Meßwerte in Randmeßwerte $\boldsymbol{y}_R(t)$, die zur Vorgabe der Beobachterrandwerte dienen, und in Stützmeßwerte $\boldsymbol{y}_S(t)$, die zum Abgleich des Beobachters verwendet werden, sowie eine entsprechende Adaption der Beobachtergewichtung $\boldsymbol{G}_F(z)$.

Unter Berücksichtigung der strukturellen Eigenschaften des Gasverteilungsprozesses kann aus Teilbeobachtern ein Gesamtnetzzustandsbeobachter aufgebaut werden. Am Rande sei vermerkt, daß dieser i. allg. einen höheren Verkopplungsgrad als das modular aus Teilmodellen zusammengesetzte Gesamtprozeßmodell aufweist. Das resultierende Netzzustandsbeobachtersystem, dessen Struktur im Bild 2 schematisch dargestellt ist, wurde auf der Basis des erwähnten Simulationsprogrammes GANESI realisiert und erfolgreich mit Betriebsmeßdaten validiert [5]. Die positiven Erfahrungen aus ersten industriellen Online-Einsätzen dieses unter dem Namen GANBEO bekannten Programmes zur Gasnetzzustands-Beobachtung lassen eine rasch zunehmende Nutzung dieser Prozeßführungshilfe erwarten. Um einen Anhaltspunkt für die zu bewältigende Beobachteraufgabe zu geben, sei erwähnt, daß in einem typischen Anwendungsfall aus etwa 15 Meßwerten rd. 100 Netzzustände rekonstruiert werden [5].

Die Bedeutung der Prozeßzustandsbeobachtung bei der Führung von Erdgasverteilungsnetzen liegt einerseits in der kostengünstigen Bereitstellung des vollständigen aktuellen Netzzustandes, der mit hinreichender Genauigkeit als Anfangszustand für die simulative Prädiktion des Netzzustandes benötigt wird, und andererseits in der damit gegebenen Möglichkeit, höherwertige Prozeßüberwachungsfunktionen zu realisieren. Diese beruhen insbesondere auf dem Sachverhalt, daß mit Hilfe der Zustandsbeobachtung die zeitliche und örtliche Korrelation der zunächst verfügbaren Einzel-Meßdaten aufgedeckt wird. So zeigen theoretische Untersuchungen und praktische Erfahrungen, daß ein geeignet dimensioniertes Beobachtersystem auch zur indirekten Überwachung der Rohrnetzanlage (siehe z. B. [8]) sowie der Steuer- und Meßeinrichtungen einschließlich der

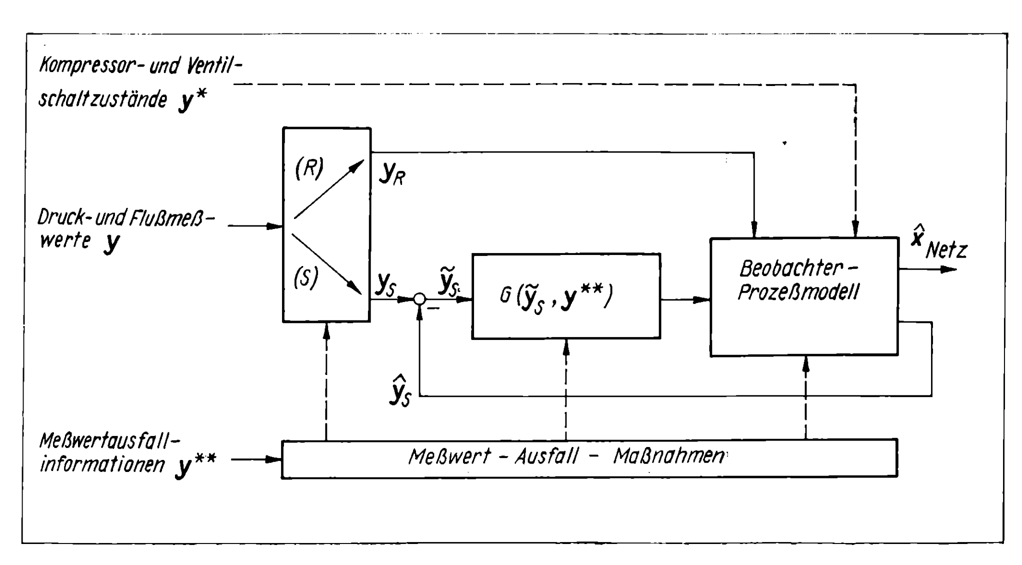


Bild 2. Struktur des Netzzustandsbeobachtersystems (schematisch)

Fernwirkanlage vorteilhaft eingesetzt werden kann. Diese aus sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gründen (z. B. Erkennung von Rohrleitungsbrüchen, gezielte Anlagenwartung) bedeutsamen Anwendungen setzen allerdings eine hinreichende Anzahl und zweckmäßige Verteilung von Meßgrößen sowie eine geeignete Auswertung der Abweichungen zwischen den gemessenen und rekonstruierten Drücken und Flüssen voraus.

4. Prädiktive Netzsteuerung

Die hier betrachteten Gastransport- und Gasverteilungsprozesse sind in der Regel durch stark veränderliche eingeprägte Störgrößen (Gasentnahmen), große Transport- und Einschwingzeiten (bis hin zu mehreren Stunden) und komplizierte in der Betriebsphase zu erfüllende Anforderungen gekennzeichnet. Letztere umfassen u. a. bedeutsame Zustandsgrößenbeschränkungen, wie etwa vorgegebene minimale Drücke an allen Gasentnahmepunkten des Netzes oder Maximaldrücke entlang den einzelnen Rohrleitungen. Zur Netzführung werden daher mit Vorteil prädiktiv arbeitende Verfahren eingesetzt.

Mit dem in das Netzführungskonzept einbezogenen Funktionsblock „Prädiktive Simulation" (vgl. Bild 1) bietet sich die bereits kurz erwähnte Möglichkeit, den zukünftigen Prozeßzustand vorherzusagen. Vom momentanen Prozeßzustand ausgehend werden durch Simulation die zukünftigen Zeitverläufe der Drücke und Flüsse im Netz, ausgehend von prognostizierten Gasentnahmen, beabsichtigten Steuerungsmaßnahmen und vorhersehbaren Anlagen- oder Versorgungsstörungen, ermittelt. Die hierzu erforderlichen Verfahren zur Gasverbrauchsprognose sind heute verfügbar (siehe z. B. [10] und [11]). Die Prädiktive Simulation ermöglicht eine vorausschauende Überwachung und Beurteilung des zu erwartenden Prozeßzustandes und — durch wiederholte Ausführung — eine Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Steuerungsmaßnahmen und somit die iterative Entwicklung einer günstigen (gegebenenfalls optimalen) Netzsteuerstrategie (siehe Bild 1).

Die als eingeprägte Störgrößen wirkenden Gasentnahmen sind nur für einen beschränkten Zeitraum mit hinreichender Genauigkeit prognostizierbar. Da die Prognoseunsicherheit innerhalb dieses Prädiktionshorizontes T_P (typischerweise 6 bis 24 h) in der Regel mit wachsender Zeit zunimmt, wird für die eigentliche Netzsteuerung nicht der volle Horizont T_P ausgenutzt, sondern in kürzeren Zeitintervallen (Steuerhorizont T_S; typischerweise 15 bis 60 min) jeweils eine aktualisierte Steuerstrategie iterativ ermittelt und auf den Prozeß aufgeschaltet. Diese gelegentlich als „Strategie-Entwicklung mit wanderndem Zeitfenster" bezeichnete Vorgehensweise ist im Bild 3 (unter Vernachlässigung aller Rechenzeiten) veranschaulicht. Da sie auch der Tatsache Rechnung trägt, daß auf den Prozeß weitere nichtprognostizierbare Störungen einwirken und daß der zur Strategieentwicklung verwendete prädizierte Prozeßzustand fehlerbehaftet ist, weist diese Art der prädiktiven Steuerung gewisse Robustheitseigenschaften auf.

Erste industrielle Anwendungen dieses prädiktiven Steuerungsverfahrens führten nach Aussagen der Gasnetzbetreiber zu merklichen Verbesserungen der Gasnetzführung. In diesen Anwendungen wird die iterative Strategie-Entwicklung von Hand durchgeführt. In Anbetracht der Komplexität des dazu erforderlichen Suchvorganges, bei dem der Prozeßbediener sowohl die Vorgehensweise festlegen als auch die Ergebnisse bewerten muß, ist für eine weitere Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei zumindest gleichbleibender Versorgungssicherheit eine automatische Netzsteuerstrategie-Entwicklung notwendig. Theoretische und experimentelle Untersuchungen hierzu werden zur Zeit durchgeführt. Erste Ergebnisse und Abschätzungen [12] deuten darauf hin, daß diese Aufgabe zumindest für angemessen reduzierte „Optimalitätsanforderungen" lösbar ist. Einige Probleme im Zusammenhang mit dieser Aufgabenstellung seien hier schlagwortartig erwähnt:

— Formulierung des Optimierungsproblems:
  Hierzu müssen die möglichen Steuerungsmaßnahmen erfaßt, prioritätenmäßig geordnet und „kostenmäßig" bewertet werden. In entsprechender Weise sind alle Restriktionen, wie Steuer- und Zustandsgrößenbeschränkungen zu erfassen und zu bewerten. Da eine unmittelbare Berücksichtigung dieser komplizierten Anforderungen zu einem nahezu unlösbaren mathematischen Optimierungsproblem führen würde, wird eine Aufteilung derart durchgeführt, daß ein die dominierenden Anforderungen umfassendes dynamisches Optimierungsproblem formuliert und gelöst wird. Die restlichen Anforderungen werden durch heuristische Verfahrensschritte berücksichtigt.
— Lösung des dynamischen Optimierungsproblems:
  Von bekannten Methoden ausgehend sind hier gezielte Maßnahmen zur Reduzierung der benötigten Rechenzeit T_R erforderlich, da in jedem Falle $T_R < T_S$ gelten muß. Neben algorithmischen Modifikationen sind hier auch Verfahren der Mehrebenen- und/oder Mehrschichten-Optimierung zu erwägen.
— Anforderungen an Geräte:
  Zumindest für größere Gasverteilungsnetze stellt die Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung hohe rechentechnische Anforderungen, die vermutlich den Einsatz relativ teuerer Hochleistungs-Prozeßrechner bedingen. Eine kostengünstigere Alternative könnten in Hardware und Software auf die Aufgabe zugeschnittene Mehr(Parallel)-Rechner-Systeme bieten [13].

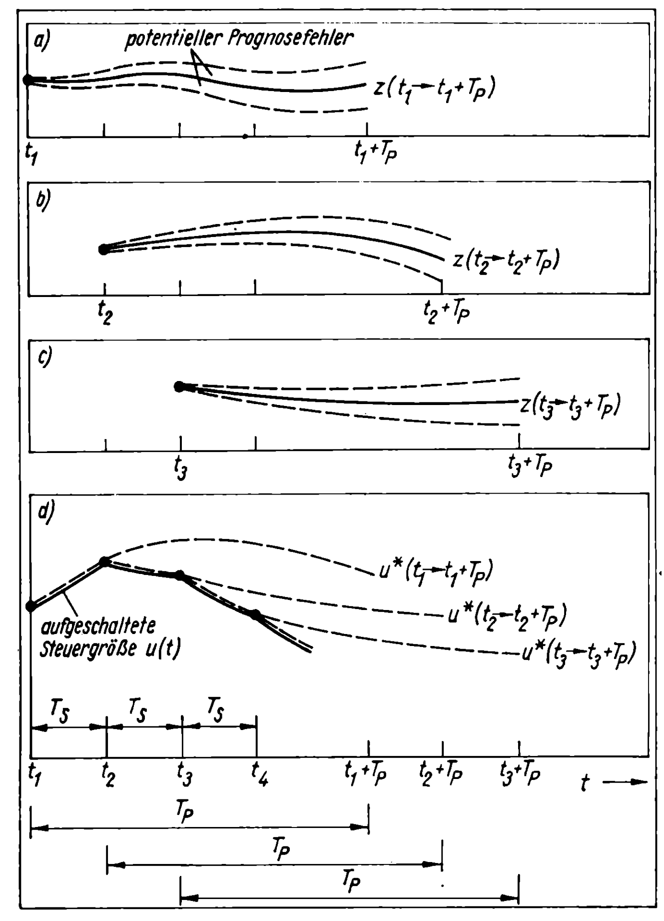


Bild 3. Veranschaulichung der prädiktiven Netzsteuerung

a) bis c) Prädizierte Störgrößen $z(t_k \to t_k + T_P)$,
d) Für den Prädiktionshorizont T_P ermittelte (optimale) Steuergrößen $u^*(t_k \to t_k + T_P)$ und tatsächlich aufgeschaltete Steuergröße $u(t)$

Zusammenfassung

Die wachsende Bedeutung von Erdgas für die Primärenergieversorgung von Haushalten und Industrien führte im zurückliegenden Jahrzehnt zu einem forcierten Auf- und Ausbau von Rohrleitungs-Transportsystemen und Verteilungsnetzen. Parallel dazu vollzog sich die Entwicklung moderner rechnergestützter Prozeßführungssysteme für die Überwachung und Steuerung der in diesen technischen Großsystemen auftretenden Transport- und Verteilungsaufgaben. Eine wichtige Rolle spielte in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß es in engem Zusammenwirken zwischen einem Universitätslaboratorium und der einschlägigen Industrie gelang, die entsprechenden Prozeßführungsaufgaben auf moderne Verfahren der Automatisierungstechnik, wie etwa der On-line-Prozeßsimulation, Prozeßzustandsbeobachtung und prädiktiven Steuerung abzustützen sowie wesentliche Teile der zugehörigen flexiblen Softwaresysteme zu entwickeln. Das vergleichsweise schnelle Aufgreifen dieser, zumindest für diesen Industriezweig, neuartigen Verfahren und die positiven Erfahrungen der Anwender mit den zur Verfügung gestellten softwaremäßigen Automatisierungshilfsmitteln sind ein Beweis dafür, wie, auch bei Vorliegen komplexer Aufgabenstellungen, die häufig beschworene Kluft zwischen Theorie und Praxis erfolgreich überwunden werden kann.

(Fortsetzung auf Seite 65)

P. Petrov; K. Djambasov[1])

Multimikrorechnersystem als Universalsteuerungsanlage[2])

0. Einleitung

Der Einsatz von Prozeßrechnern in Prozeßautomatisierungssystemen hat sich in der Mitte der 60er Jahre dank der Implementierung der Minirechner-Reihe, die die erforderliche Leistungsfähigkeit im Echtzeitbetrieb und hohe Zuverlässigkeit der Steuerung sicherte, durchgesetzt. Die Praxiserfahrung bewies, daß sich die Prozeßautomatisierung mit Prozeßrechnern nicht nur auf klassische Anwendungsgebiete beschränkt, sondern sich überall auswirkt und alle Arten von technologischen Prozessen auch mit komplizierter Steuerungsstruktur erfaßt. Während bereits diese Entwicklung der Prozeßrechner als Höhepunkt bezeichnet wurde [1], ging man schon 10 Jahre später zu einer massenhaften Einführung der Mikrorechner in der Fertigungsprozeßsteuerung über. Die intensive Entwicklung der Mikroelektronik war eine Revolution für die Prozeßautomatisierungsverfahren [2]. Es handelt sich um eine neue Aufgabenstellung der Automatisierung, bedingt durch die neuen Möglichkeiten der Systemmittel, die nicht nur aus Hardware, sondern auch aus Software bestehen.

1. Neue Möglichkeiten und Faktoren für die Realisierung von Prozeßrechner-Komplexen

Die Anwendung der Prozeßrechner auf dem Gebiet der sogenannten komplex strukturierten Großprozesse regte die Entwicklung der strukturellen Theorie der Prozeßrechner-Komplexe an. Die Implementierung eines ganzen Netzes von Einrichtungen, die zur Steuerung von Subprozessen mit lokaler Einschränkung bestimmt sind, die Realisierung eines Komplexes mit Optimalsteuerung, die noch Raumdimensionen aufweist, das sind die neuen Konzeptionen für die Errichtung der industriellen Automatisierung, ganz verschieden zu den bisher angewandten. Besondere Bedeutung gewann die massenhafte Automatisierung verhältnismäßig einfacher Prozesse, die Computerisierung der Sensortechnik sowie der klassischen PID-Regler, deren Algorithmen als Firmware-Programme in sämtlichen gegenwärtigen Steuereinrichtungen vorgesehen werden können. Die Mikrorechentechnik läßt heute leicht und preiswert die Realisierung von Zustandsbeobachtern zu. Von gemessenen Größen und Steuersignalen kann man ein dynamisches Modell des Steuerungssystems erstellen, so daß ein neues Herangehen zum Aufbau der Systeme ermöglicht wird. Mit Hilfe der Mikrorechentechnik wird die adaptive Steuerung eine nahe und reale Perspektive für die moderne Automatisierung.
Die schnelle Realisierung von Steuerungssystemen hängt zusammenfassend von folgenden Faktoren ab:

- Tiefe und eingehende vorherige Erforschung des Steuerungsobjekts
- Erstellen eines optimalen Steuerungsalgorithmus
- Errichtung eines technischen Steuerungssystems aus vorbereiteten Baugruppen und Software-Modulen
- Geeignete Verwirklichung des Steuerungsalgorithmus auf Basis der zu diesem Zweck aufgebauten Hardware-Konfiguration.

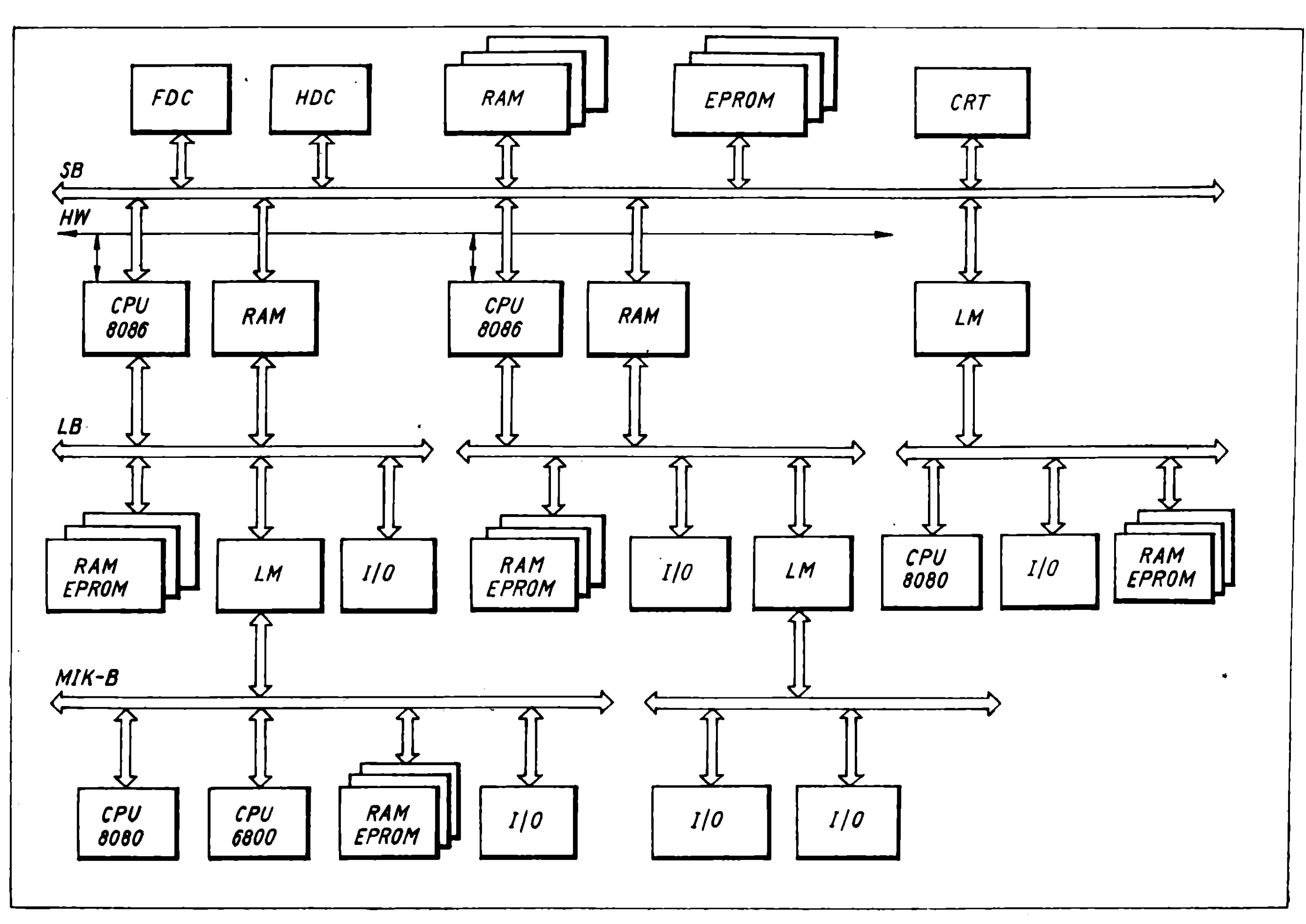
Der enge Zusammenhang zwischen den oben genannten Faktoren erlaubt nicht, sie einzeln zu bewerten. Dieser Zusammenhang zwischen den Hauptfaktoren erscheint bei der Automatisierung komplex strukturierter Prozesse besonders deutlich. Der Aufbau des technischen Systems als „universeller Prozeßrechner" hat eine eigenständige Bedeutung für den technischen Fortschritt, ohne damit dem komplexen Herangehen zur Realisierung der erwähnten Faktoren zu widersprechen. In diesem Fall soll das technische System als direkt mit der Software, die die Systemsteuerung universell macht, verbunden betrachtet werden. Im Beitrag wird eine Konzeption zum Aufbau eines noch vollständig zu entwickelnden technischen Systems darlegt.

---

[1]) Doz. Dipl.-Ing. *Peter Petrov* und Dipl.-Ing. *Krasimir Djambasov* sind Mitarbeiter am Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik (ITKR) der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften (BAdW) Sofia (genauere Angaben lagen der Redaktion leider nicht vor).

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrages wurde von Dipl.-Ing. *H. H. Hiekel*, TU Dreden, vorgenommen.

Bild. Struktur des Universalprozeßrechners



2. Grundlegende Kenngrößen des Mikrorechner-Steuerungssystems

Ausgehend von der Struktur komplex strukturierter Großprozesse können die Haupteigenschaften eines universellen Prozeßrechners abgeleitet werden, nämlich:

- Struktur-Hierarchie — sichert eine bestimmte Anordnung nach dem Master-Slave-Prinzip und eine entsprechende Organisation der Kommunikation zwischen den Strukturelementen
- Multifunktionsfähigkeit — gleichzeitige Ausführung der gegenseitig verbundenen Funktionen und Sicherung der Möglichkeit zur funktionellen Selbständigkeit der einzelnen Subsysteme
- Flexible Anwendung der Prinzipien der zentralisierten und dezentralisierten Steuerung. Das Vorhandensein einer Möglichkeit zur stärkeren oder schwächeren Kopplung innerhalb des hierarchischen Systems, die sich aus dem Charakter des Steuerprozesses ergibt
- Möglichkeiten beim Konfigurieren der einzelnen Subsysteme, die den selbständigen Aufbau von Steuerungssystemen verschiedener Kompliziertheitsgrade sichern und eine Funktionserfüllung ohne Überschuß gewährleisten.

3. Multimikrorechnersysteme als Grundlage für Datenverarbeitung und Steuerung von Großprozessen

Die Möglichkeit zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit eines auf Multimikroprozessorbasis realisierten Prozeßrechners bringt wesentliche Vorteile bei der Realisierung des im „Echtzeitbetrieb" arbeitenden Prozeßsteuerungssystems [3] und [4]. Die Rechenleistung zur Parallelverarbeitung und die gleichzeitige Dezentralisation der Systemfunktionen garantieren Flexibilität und zugleich Komfort mit einer fehlertoleranten Organisation für den Echtzeitbetrieb. Fehlererkennung, Fehlerbeseitigung, Fehlermeldung, Selbstdiagnose, Rekonfiguration und Verteilung der Steuerfunktionen sind gewöhnliche Funktionselemente des Multimikroprozessorsystems. Die Errichtung von Strukturen auf der Basis des Multimikrorechnersystems ermöglicht den Aufbau von praktisch einwandfreien Steuerungssystemen durch Rekonfiguration und bei allmählichem Abbau des Funktionsumfanges. Die modulare Bauweise sowohl der Hardware als auch der Software ist die notwendige Voraussetzung zur Realisierung eines Universalprozeßrechners und sichert den Neuaufbau aller Arten von Steuersystemen.

4. Struktur des Universalprozeßrechners (Bild)

Hier können drei Bustypen unterschieden werden:
- Systembus (SB) — 16 bit
- Lokalbus (LB) — 16 bit
- Peripherie-Mikrorechner-Bus — 8 bit.

Der Systembus, der auf der Basis des „Multibusses" entwickelt wurde, umfaßt einen oder mehrere 16-bit-Mikrorechner mit Mikroprozessoren der Familie iAPX 86® mit Aussicht zur Anwendung von iAPX 186® und iAPX 286® (®trade-mark der INTEL Corp.). Jeder Mikrorechner, der diesen Bus nutzt, kann Zugriff zu den Gesamt-System-Ressourcen bekommen, wie Arbeitsspeicher, Festwertspeicher, Bedienungskonsole, Drucker sowie die an dem Systembus angeschlossenen 8-bit-Subsysteme in Form von Peripherie-Mikrorechnern. Jeder Mikrorechner hat eine serielle Schnittstelle, wodurch er an ein Rechnernetz angeschlossen werden kann. An dem System wird eine Multi-Master-Organisation der dazugehörigen Mikrorechner gewährleistet. Jeder dieser Mikrorechner besteht aus einer bestimmten Anzahl von Modulen, z. B. dem ZVE-Modul (CPU), der auch mit dem 16-bit-Lokalbus gekoppelt ist. So kann jeder Mikrorechner mit Hilfe seines Lokalbusses mit dem eigenen RAM arbeiten, ohne die System-Ressourcen zu benötigen. Gleichzeitig ist zu allen RAM-Modulen ein Zugriff der anderen Master des Systembusses möglich. Diese RAM-Module können auch als gemeinsame System-Ressourcen über den Systembus genutzt werden, so wie dies auch für die EPROM-Module, Floppy-Disk-Controller (FDC), Hard-Disk-Controller (EDC), CRT-Controller u. a. möglich ist.

Die 8-bit-Systeme basieren ganz auf den schon realisierten Mikrorechnersystemen, die in diesem Fall auf der Basis der Mikroprozessoren MC 6800 und MC 6809 oder INTEL 8080 und 8088 aufgebaut sind. Diese Subsysteme können mit dem System- oder Lokalbus durch ein Verbindungsmodul gekoppelt werden. Der Verbindungsmodul definiert entweder einen untergeordneten Betrieb, wenn die 8-bit-Struktur eine Ressourcen-Erweiterung des 16-bit-Systembusses ist, oder einen System-Master-Betrieb, bei dem in der 8-bit-Struktur ein oder mehrere 8-bit-Mikroprozessoren mit Zugriff zu den gemeinsamen Ressourcen des Systembusses angeschlossen sind. In beiden Fällen kann die 8-bit-Konfiguration mit dem Systembus oder dem Lokalbus durch ein Verbindungsmodul gekoppelt werden. Andererseits kann der 8-bit-Bus bis zu vier Master und dazu auch den Kopplungsmodul steuern, wenn das Subsystem im System-Master-Betrieb ist.

Die Organisation der gezeigten Funktionen und auch die notwendige Leistungsfähigkeit der Hardware-Konfiguration wird durch das Betriebssystem, das ähnlich dem iRMK® ist, gesichert. Diese Organisation erlaubt die Anwendung einer höheren Programmiersprache, wie PASCAL, und die universelle Herangehensweise bei der Erstellung von Anwenderprogrammen. Es wird ein Programmpaket entwickelt, das die Ausnutzung auch von anderen höheren Programmiersprachen sichert, so daß eine Universalität und Kompatibilität mit den vorliegenden Steuerungssystemen erzielt wird.

5. Anwendung

Eine geeignete Anwendung der so dargelegten Multimikrorechner-Konfiguration wird jetzt für ein typisches komplex strukturiertes System, wie es ein robotisiertes Produktionssystem ist, ausgearbeitet. Die Steuerung von Mehrgriffrobotern oder Robotern mit zugeordneten Funktionen erfordert in dem verfahrenstechnischen Prozeß gerade solche Konfigurationen. Die typische Hierarchie des Steuerungsprozesses bei Industrierobotern der modernen Generation, die Steuerung von „intelligenten" Sensoren und einzelnen Bewegungsachsen, die von einem leistungsfähigen Steuerungssystem koordiniert werden — das sind die Merkmale, die die entwickelte Mikrorechner-Struktur für eine Anwendung sehr geeignet machen.

In Zukunft kann die Realisierung von kundenspezifischen Modulen in Universalprozeßrechnern als Alternative zum Aufbau eines derartigen Modulsystems erwartet werden. Die starke Entwicklung der Gate-Array- und ULA-Prinzipien und ihre immer weitere Ausnutzung sind Grund zu der Annahme, daß sich diese Prinzipien immer mehr durchsetzen und zur besseren Realisierung der Konfiguration für Steuerungen aller Systemniveaus beitragen werden [5]. Höhere Zuverlässigkeit, hohe Wirksamkeit des Systems und optimale Produktivität des Automatisierungsprozesses können erreicht und gesichert werden, wenn vor allem in dem Steuerungssystem alle Funktionen tiefer und umfangreicher erfaßt werden.

Literatur

[1] *Schmidt, G.; Freyberger, F.:* Konzeptionelle Entwicklungen und Tendenzen der Prozeßautomatisierung. rtp 23 (1981) 11, S. 383–390.
[2] *Färber, G.:* Mikroelektronik — Entwicklungstendenzen und Auswirkungen auf die Automatisierungstechnik. rtp 24 (1982) 10, S. 326–335.
[3] *Petrov, P.; Djambazov, K.:* Eine Konzeption für ein 16-Bit-Multimikroprozessorsystem zur Steuerung im Echtzeitbetrieb. 1. Gemeinsames Seminar ITKR-BAdW und IfR der Universität Hannover, Varna, Okt. 1981.
[4] *Petrov, P.:* Multimikrorechnersysteme zur Echtzeitsteuerung von komplexen Prozessen. 27 IWK der TH Ilmenau, Okt. 1982.
[5] *Töpfer, H.; Kriesel, W.:* Zum Generationswechsel bei Automatisierungssystemen. rtp 24 (1982) 10, S. 336–341. msr 8003

(Fortsetzung von Seite 63)

Literatur

[1] *Lappus, G.; Schmidt, G.:* Prozeßführungshilfen für Gasverteilungsnetze. gwf-gas/erdgas, 124 (1983), S. 131–137.
[2] *Weimann, A.:* Modellierung und Simulation der Dynamik von Gasverteilnetzen im Hinblick auf Gasnetzführung und Gasnetzüberwachung. Dissertation, Technische Universität München 1978.
[3] *Weimann, A.; Schmidt, G.:* Transient Simulation of Natural Gas Distribution Networks by Means of Medium-Sized Process Computers. Preprints of the 5th IFAC/IFIP Conf. on Dig. Comp. Appl. to Proc. Contr. 1977, Den Haag, 14/17 Juni, North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1977.
[4] *Lappus, G.:* Analyse und Synthese eines Zustandsbeobachtersystems für große Gasverteilnetze. Dissertation, Technische Universität München (in Vorbereitung).
[5] *Lappus, G.:* Ein Beobachtersystem zur Ermittlung des Strömungszustandes in Hochdruckgasverteilnetzen — Anwendungsorientierter Entwurf und praktische Erfahrungen. INTERKAMA-Kongreß, Düsseldorf 1983.
[6] *Fischer-Uhrig, F.; Weimann, A.:* On-line-Anwendung von Prozeßmodellen bei der Führung von Gasverteilnetzen. INTERKAMA-Kongreß 1977. Berlin: Springer-Verlag 1977.
[7] *Hastings-James, R.:* A Recursive Filter for Gas Pipeline Networks. IEEE Transactions IECI-32 (1976), S. 455–461.
[8] *Lappus, G.; Schmidt, G.:* Supervision and Control of Gas Transportation and Distribution Systems. Preprints of the 6th IFAC/IFIP Conf. on Dig. Comp. Appl. to Proc. Contr. 1980, Düsseldorf 14/17 Oct., Pergamon Press, Oxford, pp. 251–258.
[9] *Luenberger, D. G.:* Observers for Multivariable Systems. IEEE Transactions AC-11 (1966), pp. 190–197.
[10] *Winkler, P.:* GAPP — Ein Programmbeispiel zur kurzfristigen Gasverbrauchsprognose. Bericht PDV-E 137, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1980.
[11] *Ady, E.; Rauch, E.:* Ein adaptives Prognoseverfahren zur Vorhersage des Gasverbrauches. gwf-gas/erdgas 120 (1979), S. 458–462.
[12] *Paijo, B.; Schmidt, G.:* Anwendung eines prädiktiven Regelverfahrens auf ein Teilsystem eines Erdgasverteilnetzes. 1. Berichtskolloquium des DFG-Schwerpunktprogrammes „Messen, Steuern, Regeln von Systemen mit komplexer Struktur", Stuttgart 1983.
[13] *Schmidt, G.:* The Role of Multi-Microcomputers in Automatic Control. Proc. of the 4th Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems, 16/19 Dec. 1980, Versailles. Berlin: Springer-Verlag S. 899–919. msr 800

W. Fritzsch[1])

Aspekte der Steuerungstechnik in der automatisierten bedienerarmen Produktion

0. Einleitung — Gegenwärtige Aufgabenstellungen der Fertigungstechnik

Problemstellungen der Fertigungstechnik werden gegenwärtig umschrieben mit den Begriffen

- Integrierte Fertigungen (Integration des Material- und Werkzeugflusses in den automatischen Ablauf)
- Flexible Fertigung
- Bedienarme/automatische Fabrik (Vorstufe: Dritte unbemannte Schicht).

Die den Begriffen zugehörigen Lösungsformen sind aber nicht zwangsläufig gekoppelt. Flexibilität ist auch auf niedrigem Automatisierungsniveau möglich, sinnvoll und notwendig.
Die *gegenwärtige Situation* ist gekennzeichnet durch

- zunehmende Absatzschwankungen
- spezifische Kundenwünsche
- harte Konkurrenz am Weltmarkt
- schrumpfende Märkte
- Verkürzung der Produktionslebensdauer (moralischer Verschleiß).

Diese Sachzwänge führen zu sinkenden Auftragsstückzahlen, die man durch Erhöhung der angebotenen Variantenvielfalt (erzielt mit Variationen der Serienprodukte) und durch die Erweiterung der Produktpalette aufzufangen sucht. Dadurch werden die Forderungen an die Fertigungsaufgaben wesentlich vielfältiger. Aber auch unter diesen Randbedingungen ist oberste Zielstellung die *Sicherung der Produktivität.* Hierfür wird zunehmend als Mittel die *Flexibilität* des Produktionssystems eingesetzt. Flexibilität ist im wesentlichen gekennzeichnet durch

- Durchlaufzeitverkürzung bei den Erzeugnissen:
  Reduzierung der Vielfalt der Arbeitsvorgänge auf weniger, aber komplexere Operationen; *Haupteinflußgrößen*: Verfahrensintegration, Fertigungstechnologie, Maschinenleistung
- Bessere Maschinenauslastung:
  Vermeidung unproduktiver Zeiten, geringere Folgewirkungen bei Betriebsmittelausfällen (Fehlertoleranz); *Haupteinflußgrößen*: Rüst-, Wechsel- und Wartezeiten, Pausenüberbrückung, unbemannte 3. Schicht
- Bearbeitungsmöglichkeiten für wechselnde Produkte unterhalb der Kapazitätsgrenzen; *Haupteinflußgrößen*: schnelles Umrüsten, Maschinentauglichkeit für mehrere Werkstücke, Mehrverfahrenmaschinen
- Spielraum für nachträgliche Produktveränderungen und Substitutionsprodukte; *Haupteinflußgrößen*: schnelle, kostengünstige Umbaubarkeit, Anpaßbarkeit an verschiedene Anforderungen.

Flexibilität ist demzufolge nicht nur eine Eigenschaft des technologischen Basissystems; sie wird ebenso durch das zugehörige Steuerungssystem und die Fertigungsorganisation gewährleistet.

1. Produktionsprozeß: Automatisierungsebenen und Hauptfunktionen

1.1. Ebenenstruktur

Die Produktion eines Erzeugnisses von der Konstruktion bis zur Montage und dem Versand erfolgt arbeitsteilig in mehreren Ebenen unter Beteiligung unterschiedlicher Spezialistengruppen (Bild 1). Zur Beherrschung der umfangreichen Informationsflüsse und Steuerungsprobleme werden in allen Ebenen rechnergestützte Verfahren eingeführt. Jede Ebene arbeitet mit spezifischen Modellen. Dadurch konnte sich in den Ebenen ein horizontaler Datenfluß gut ausbilden. Ein durchgängiger automatisierter Informationsfluß in vertikaler Richtung über verschiedene Ebenen ist gegenwärtig jedoch nur schwach ausgeprägt. Eine rechnerintegrierte Fertigung erfordert dies.

[1]) Prof. Dr. sc. techn. *Wolfgang Fritzsch* (52) studierte von 1950 bis 1955 Elektrotechnik an der TH Dresden. Anschließend bis 1960 Assistent am Institut für Elektrische Antriebe und Bahnen und am Institut für Hochspannungstechnik der TH Ilmenau. 1960 Promotion A zu „Impulsgesteuerten Gleichstromantrieben". Von 1960 bis 1965 in Jena und Dresden im Zentralinstitut für Automatisierung, zuletzt als Hauptabteilungsleiter. Von 1965 bis 1967 Fachbereichsleiter Geräteentwicklung im Institut für Datenverarbeitung Dresden. Von 1967 bis 1969 im VEB RAFENA-Werke Radeberg tätig, ab 1968 als Direktor für Forschung und Entwicklung. 1969 Berufung zunächst zum Honorarprofessor und dann zum ordentlichen Professor für Prozeßautomatisierung an die TH Karl-Marx-Stadt. Dort bis 1981 Leiter des WB „Prozeßautomatisierung und Automatisierungsgeräte". 1979 Promotion B zu Fragen der Prozeßrechentechnik. Vorstandsmitglied der WGMA.

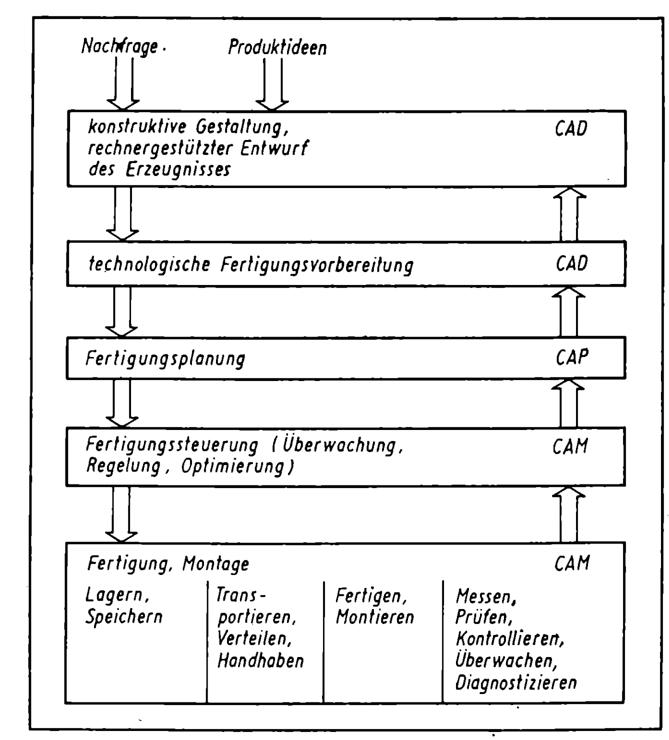


Bild 1. Ebenenstruktur und Hauptfunktionen eines Produktionsprozesses

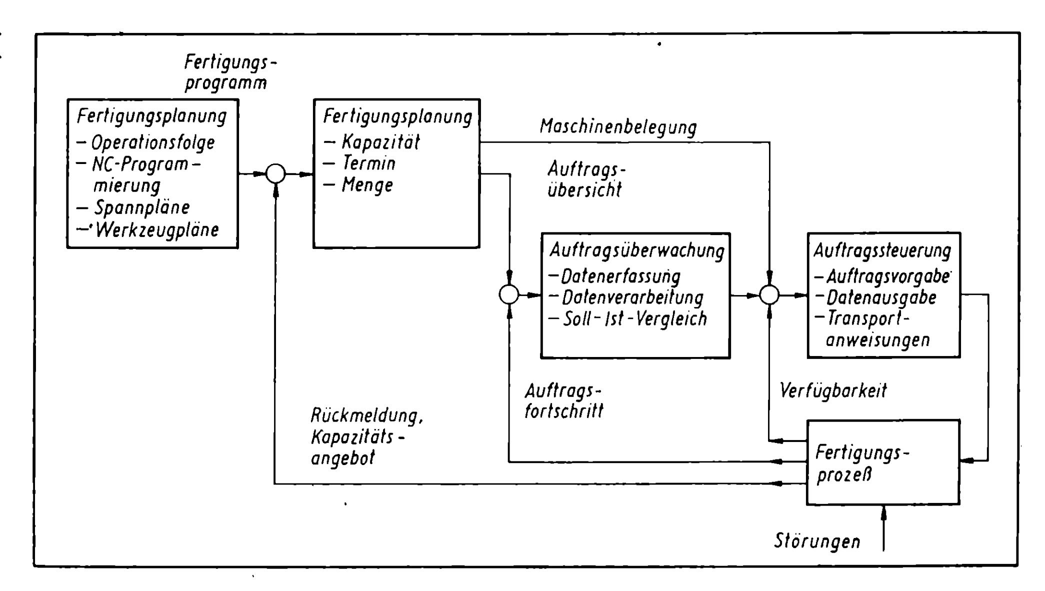
1.2. Kopplung von CAD/CAM-Komponenten

Die Integration unterschiedlicher Ebenen (Bild 1) durch eine vertikale Informationsverknüpfung wird als Modellaustausch zwischen den in den Ebenen verwalteten Modellen bezeichnet. Ziel der Lösung dieses Schnittstellenproblems ist die Bereitstellung von Daten (Modellen) für die weitere Verwendung in anderen Bereichen. Um das erneute Eindigitalisieren des Quellmodells in das Empfängersystem zu umgehen, wurde als Konzept zur Modellübertragung die IGES-Schnittstelle definiert (IGES = Initial Graphics Exchange Specification [1]).

Tafel. Spracheingabesystem, Anwendungsbeispiele [2]

Qualitätssicherung		
Metallverarbeitung	Dateneingabe zur statistischen Fehlerkontrolle bei Getränkedosen. Jede Dose eines Prüfloses durchläuft 50 Messungen und visuelle Tests	Automatische Berichtserstellung; Verdichtung von (7 ... 100) · 10³ Messungen je Woche
Elektronikindustrie	Visuelle Kontrolle von Fernsehbildröhren, Leiterplatten	
Auto- und Flugzeugindustrie	Visuelle Teilekontrolle	Vermeiden von Schreibarbeit, Verringerung der Ausschußquote
Transport- und Lagerwesen		
Ersatzteillagerhaltung und Disposition	Eingabe von Teilenummern, Auftragsnummern, Zustand	Keine Listen- und Karteiarbeit mehr
Fertigung		
NC-Programmierung	Spracheingabe mit Bildschirmführung. Aufgerufene Befehle werden auf Bildschirm dargestellt	Konventionelle Erstellung: 1500 Streifen/Jahr bei 8–9 h Arbeitszeit/Tag. Mit Spracheingabe: 2000 Streifen/Jahr bei 5 h Arbeitszeit/Tag; Produktivitätssteigerung 50%

Bild 2. Datenfluß in einem rechnergestützten System zur Produktionssteuerung (Kaskadenregelung)



1.3. *Spracheingabe*

Rechnergestützte Verfahren arbeiten vielfach mit Tastatureingaben und Bildschirmdialog. Zur Reduzierung der Fehlerquoten finden neuerdings besonders Spracheingabe-Systeme in der Fertigungsindustrie Eingang. Sie sind gegenwärtig gekennzeichnet durch die Merkmale:

- Wortschatz begrenzt, mehrere hundert Wörter wählbar
- Worttrennung durch erkennbare Pausen erforderlich
- Wortschatz-Eingabe in das System erfolgt in einer Trainingsphase (mehrmaliges Vorsprechen).

Einige Anwendungsbeispiele enthält die Tafel.

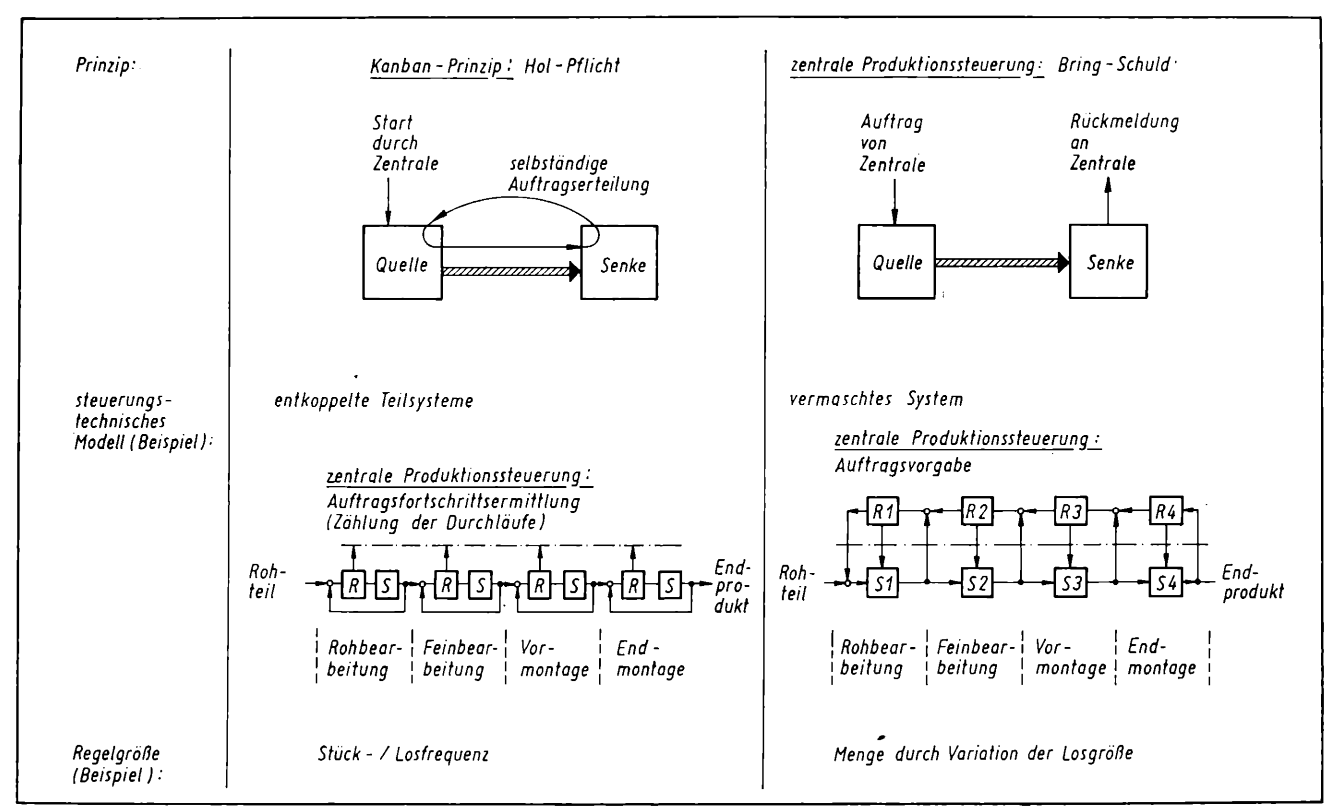
1.4. *CAD-Systeme*

In ihrer Anwendungsbreite stehen CAD-Systeme heute erst in den Anfängen. Bisherige Einsatzfälle sind vorwiegend Insellösungen, bei denen die EDV als verfahrenstechnisches Hilfsmittel eingesetzt wird, ohne das mögliche Leistungsspektrum voll auszunutzen, z. B. als rechnergestützte Zeichenmaschinen. Die für CAD-Systeme genutzten Rechner umspannen den Bereich vom Kleinrechner (Technologenarbeitsplatz) bis zum Großrechner; Speicherkapazitäten: 64 bis 512 K Worte (8 und 16 bit).

1.5. *Produktionssteuerung*

Eine hohe Flexibilität setzt geeignete Planungs- und Steuerungssysteme voraus, die notwendige Führungsinformationen bei großer Transparenz des Betriebsgeschehens schnell zur Verfügung stellen können. Fertigungsplanung, Auftragsüberwachung und Auftragssteuerung im Produktionsprozeß werden über Soll-Istwertvergleiche geeigneter Größen (Maschinenbelegung, Maschinenverfügbarkeit, Auftragsfortschritt u. a.) realisiert. Funktionell lassen sich diese Vorgänge als Kaskadenregelung auffassen (Bild 2). Bei dieser zentralen Produktionssteuerung ergibt sich regelungstechnisch ein vermaschtes System, das nach dem Prinzip der „Bringschuld" organisiert ist (Bild 3). Aufgrund eines Auftrages der zentralen Produktionssteuerung ist eine bestimmte Art und Menge zu einem festgelegten Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen. Regelgröße ist hierbei vorwiegend die Menge. Eine Steuerung ist durch Variation der Losgrößen möglich. Ein anderes Steuerungskonzept, das die automatische Produktion zum Ziel hat, ist das japanische Kanban-System (Kanban = Karte) [3]. Auf dem Kanban als Informationsträger sind alle Daten der Teile, Adressen der verbrauchenden und produzierenden Abteilungen, Abholzeiten usw. vermerkt. Die Produktion wird hier nach dem „Hol-Prinzip" organisiert. Dadurch

Bild 3. Dezentrale und zentrale Produktionssteuerung



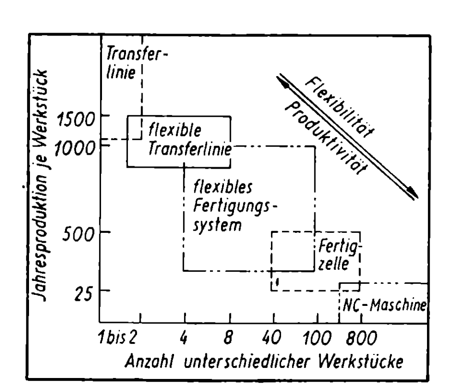


Bild 4. Einsatzbereiche verschiedener Fertigungskonzepte [4]

entstehen entkoppelte Teilsysteme (Bild 3), in denen die Stückfolge bzw. Losfrequenz geregelt werden.

1.6. *Fertigungssysteme*

In der Ebene der unmittelbaren Fertigung und Montage sind eine Reihe unterschiedlicher Automatisierungsstufen realisiert. Abhängig von der Zahl der zu fertigenden Varianten eines Werkstückes und der Zahl der Werkstücke werden verschiedene Fertigungskonzepte verwirklicht (Bild 4).
Flexibilität und Produktivität sind hierbei gegenläufig. Über eine genauere Untersuchung der technologischen Anforderungen an die Komponenten (Werkzeugmaschinen, Transportsysteme, Spannstationen, Werkzeugversorgung, Meß- und Kontrollplätze) erhält man die notwendigen Steuerungsaufgaben. Mit wachsender Flexibilität nimmt die Entscheidungsvielfalt der Steuerungssysteme zu, die Zahl der zu verarbeitenden Informationen wächst schnell an.
Ausgewählte Zielgebiete für Automatisierungsansätze sind gegenwärtig:
CNC: Erschließung neuer Anwendungsbereiche, z. B. Schleifmaschinen mit Rechnersteuerungen für den Abrichtvorgang oder das Pendel- und Oszillationsschleifen; Adaptivsteuerungen zur Kompensation von Ungenauigkeiten durch thermische und elastische Einflüsse (Schichtbeginn, längerer Stillstand, Ablenkung des Werkzeuges bei unterschiedlichen Materialhärten).
Überwachungs- und Diagnosesysteme: Werkzeugbruchkontrolle und -standzeitüberwachung, Werkstückidentifizierung, Werkstückvermessung im laufenden Betrieb (z. B. mit Meßtaster im Werkzeugrevolver), Lokalisierung von Maschinenschwachstellen und -defekten, Ferndiagnose mittels zentraler Simulationsmodelle und Datenfernübertragung.
Industrieroboter: Werkstückhandhabung zur Ver- und Entsorgung sowie Montage, rechnergestützte Positioniersysteme von Greifern, Werkstückidentifikation durch bildverarbeitende Systeme.

2. Automatisierungskonzepte

Gegenwärtig vollzieht sich in der Gestaltung von Fertigungen ein Wandlungsprozeß, der durch die Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik unter Verwendung mikroelektronischer Bausteine eingeleitet wurde. Die Entwicklung wird gekennzeichnet durch:

dezentrale Strukturen

parallele Organisation — asynchrone Steuerung.

Die theoretische Behandlung von Systemen und Prozessen der Fertigungstechnik bereitet wegen der Hochdimensionalität erhebliche Schwierigkeiten. Um den Anschluß an bekannte theoretische Verfahren zur Behandlung hierarchischer vorwiegend kontinuierlicher Systeme zu finden, erscheint ein Modellierungsansatz zweckmäßig, bei dem der Fertigungsprozeß in Teilprozesse zerlegt und das Gesamtziel durch Koordination der Teilzielstellungen gefunden wird.

2.1. *Modellierungsansatz*

In flexiblen Fertigungssystemen überlagern und beeinflussen sich drei strukturierte und zeitveränderliche Teilsysteme, die durch selbständige Automatisierungseinrichtungen auf das jeweilige Teilziel zu steuern sind:

1. das System der technologischen Ausrüstung, die Arbeitsmittel. Die meist ortsfesten Elemente sind die Operatoren, beschrieben durch Steuer- und Zustandsgrößen
2. der ablaufende Prozeß. Elemente sind die Operationen, gekennzeichnet z. B. durch die Bearbeitungsdauer
3. das „System" Erzeugnis. Elemente sind die Operanden, gekennzeichnet z. B. durch geometrische Abmessungen, Eigenschaften oder Erzeugnismengen.

Die Operatoren führen hierbei an vorgelegten Operanden unterschiedliche Operationen aus. Bei flexibler Fertigung verschiedener Erzeugnisse und Losgrößen auf demselben Fertigungssystem wird jedem Operanden eine Prozeßstruktur (Prozeßgraph, Arbeitsplan) zugeordnet. Da mehrere Operanden gleichzeitig bearbeitet werden, ergibt sich die vollständige Prozeßstruktur aus der Vereinigung der Teilprozeßstrukturen.
Bild 5 zeigt hierzu ein Beispiel. Auf einem flexiblen Fertigungssystem werden Teile A der Losgröße a und Teile B der Losgröße b in unterschiedlicher Reihenfolge der Operationen gefertigt.
Bild 6 zeigt den zeitlichen Ablauf der Teilprozesse für die Operationen (Reihenfolge) und der Operanden (Arbeitsfortschritte), Q_i sind hierbei die beschreibenden Zustandsgrößen. Die angestrebten Teilziele in der Führung der Teilprozesse und das zu koordinierende Gesamtziel:

Durchlaufzeit der Erzeugnisse = Min!

sind im Bild 6 dargestellt.
Mit diesem Modellierungsansatz lassen sich nunmehr auch Aufgaben der Fertigungstechnik mit den bisher bekannten Koordinierungsverfahren der Theorie hierarchischer Systeme behandeln.

2.2. *Automatisierungsanlagen*

Die im Modellierungsansatz formulierten Steuerungsaufgaben bei Fertigungssystemen müssen theoretisch mit den Verfahren

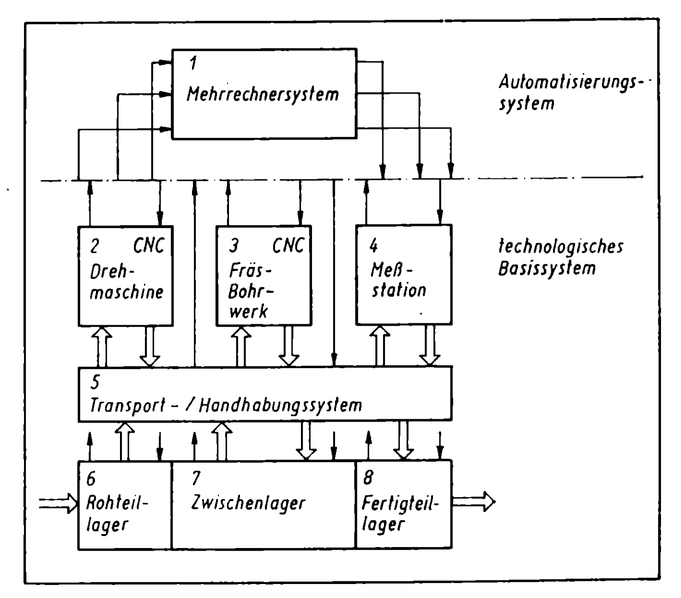
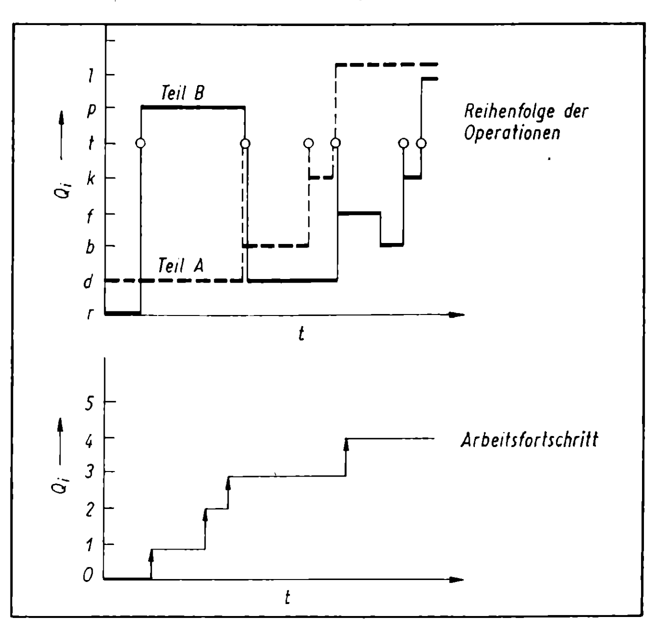


Bild 5. Beispiel eines flexiblen Fertigungssystems

Bild 6. Prozeßabläufe und Zielformulierungen bei einer flexiblen Fertigung



für Große Systeme behandelt werden. Gerätetechnisch lassen sie sich offensichtlich mit verschiedenen Strukturen realisieren. Bisher ungeklärt ist das Problem der Auswahl der besten Steuerungsstruktur. Hierzu sind Gütekriterien erforderlich, die bei Erfüllung der Gesamtzielstellung den Aufwand an Hard- und Software, die Nutzerfreundlichkeit, die Zuverlässigkeit und die Anlagensicherheit zu vergleichen gestatten. In Unkenntnis dieser Zusammenhänge wurden Automatisierungsanlagensysteme im Maschinenbau ausschließlich nach dem Hierarchiekonzept und in Baumstruktur ausgeführt (Bild 7). Ein Wirtschaftlichkeitsnachweis konnte direkt noch nicht geführt werden. Im Hierarchiekonzept besitzen die Einheiten der jeweils höheren Ebene Priorität gegenüber denen der unteren Ebenen. Die untere Ebene ist auf Informationen von oben angewiesen. Aus der Sicht der Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz erscheinen aber auch in Automatisierungsanlagen für flexible Fertigungen verteilte Systeme günstiger (Bild 8). Hier werden gleichberechtigte Einheiten über eine Datenbahn gekoppelt. Diese Anlagenstrukturen finden im Bereich der Verfahrens- und Energieindustrie immer breitere Verwendung. Hierbei tritt, für bedienarme/automatisierte Fertigung relativ neu, das Problem der zentralen Bedienerführung über eine Warte auf, das unter den besonderen Bedingungen der Mensch-Maschine-Kommunikation gesehen werden muß.

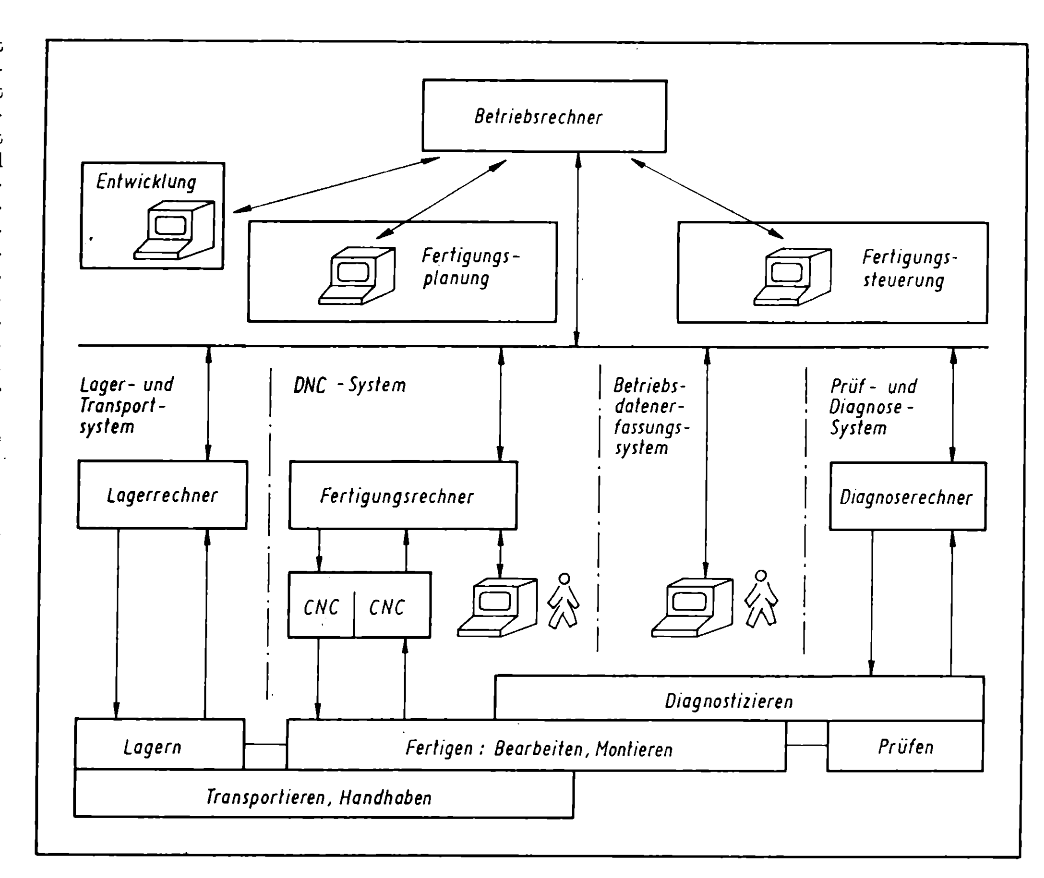


Bild 7. Prinzipielle Mehrrechner-Hierarchiestrukturen

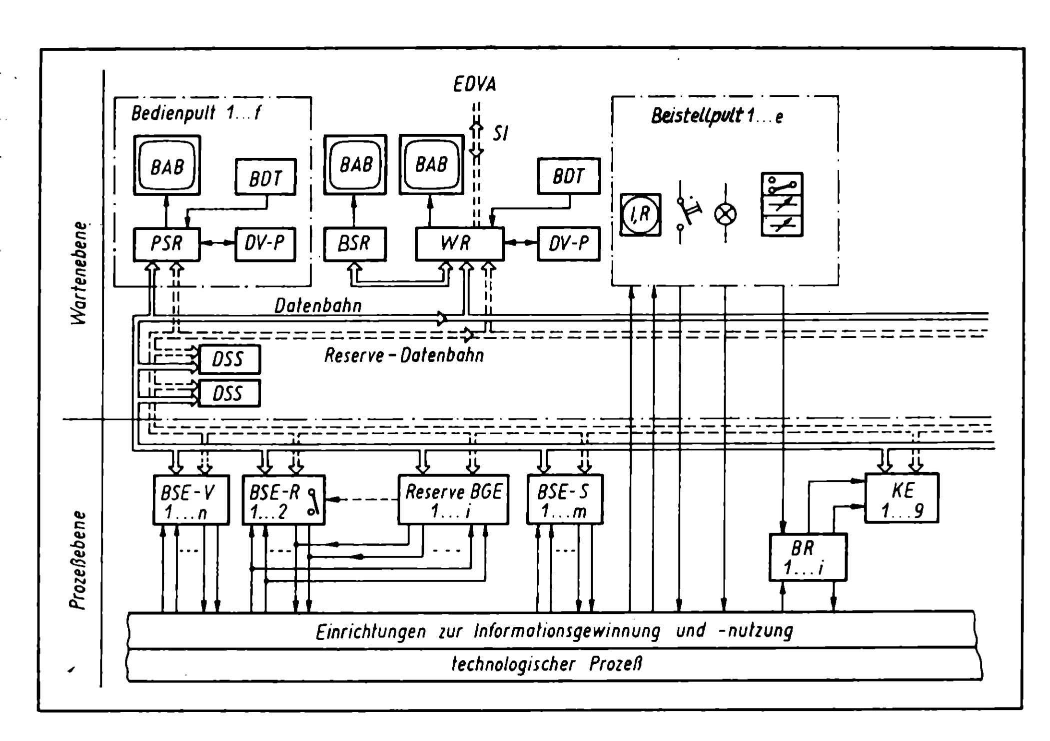


Bild 8. Prinzipielle verteilte Mehrrechnerstruktur [5]

Zusammenfassung

Die technische und organisatorische Beherrschung der Fertigungsaufgaben unter gegenwärtigen Absatzbedingungen erfordert eine erhöhte Automatisierung und Flexibilität. Im Beitrag werden Ansätze für Automatisierungsmaßnahmen erörtert, wie sie mit Mitteln der Mikroelektronik und EDV heute möglich sind. Wichtig erscheint dem Autor die Modellierung von Aufgaben der Fertigungsautomatisierung unter steuerungstechnischen Aspekten, um damit den Anschluß an bekannte Lösungskonzepte für Große Systeme — wie sie vorwiegend für kontinuierliche Systeme entwickelt wurden — zu sichern und unter den speziellen Bedingungen diskontinuierlicher Systeme weiterführen zu können.

Literatur

[1] ANSI (American National Standards Institute): Digital Representation of Product Definition Data (Y 14.26 M). September 1981.

[2] *Müller, T. W.:* Automatisierung von Konstruktion und Fertigung durch Anwendung von Spracheingabesystemen. ZwF 77 (1982) 4, S. 145–148.

[3] *Wildemann, H.:* Produktion auf Abruf. Werkstattsteuerung nach japanischen Kanban-Prinzipien. VDI-Z 125 (1983) 3, S. 53–59.

[4] *Mertins, K.:* Entwicklungsstand flexibler Fertigungssysteme in den USA. ZwF 76 (1981) 2, S. 81–85.

[5] *Neumann, P.; Poser, P.; Sadowski, H.; Schönemann, R.:* Ein neues Automatisierungsanlagensystem für verfahrenstechnische Prozesse. VEB Geräte- und Regler-Werke Teltow. msr 7963

W. Weller[1])

Lernfähige Mikrorechnersteuerungen für Industrieroboter

0. Einleitung

Industrieroboter finden derzeit vorwiegend im Bereich der materiellen Produktion einen sich stark ausweitenden Einsatz mit weitreichenden Folgen. Dort besteht eine Tendenz zu kleineren Fertigungsserien und häufigem Produktwechsel. Damit erhöht sich der Bedarf an flexibel einsetzbaren Industrierobotern mit kurzer Umrüstzeit, wobei sich die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit (Intelligenz) fortlaufend erhöhen. Besondere Bedeutung erhalten hierbei lernfähige Industrieroboter. Ihr wesentlichstes Merkmal besteht darin, daß das Verhalten bzw. Steuerprogramm nicht in einem vorangestellten Entwurfs- und Programmierprozeß festgelegt, sondern in einem Lernprozeß entwickelt wird. Hierbei erfolgt eine Selbstorganisation, in deren Verlauf das jeweilige Steuerprogramm durch einen Meta- bzw. Lernalgorithmus selbsttätig generiert und abgespeichert wird.
Im Beitrag wird über verschiedene Lösungen lernfähiger diskreter Steuerungen, die für Industrieroboter einsetzbar sind, zusammenfassend berichtet und auf Anwendungen eingegangen.

1. Interpretation der Robotersteuerung als diskretes Steuerungsproblem

Im weiteren werden Industrieroboter vorausgesetzt, die nach dem Prinzip der Punktsteuerung arbeiten. Hierbei kann es sich entweder um eine Punkt-zu-Punkt-(PTP-) oder Multipunkt-(MP-) Steuerung handeln [1]. Bei dieser Steuerungsart nimmt das Handhabungsobjekt (Greifer bzw. Werkzeug) innerhalb des durch die Anzahl n der bestehenden Freiheitsgrade bestimmten und begrenzten Raumes $\boldsymbol{R}^n$ aufgabengemäß nacheinander gewisse Positionen p einer endlichen Menge $\boldsymbol{P}$ ein und führt dort vorgesehene Aktionen $a \in \boldsymbol{A}$ (einschließlich der leeren Aktion) aus. Die geforderten Positionen und Aktionen repräsentieren gewünschte Zustände z des Roboters, deren Menge $\boldsymbol{Z}$ ebenfalls endlich ist. Die Aufgabe der Punktsteuerung besteht somit in der Realisierung einer bestimmten Zustandsfolge $\{z\}$, $z \in \boldsymbol{Z}$, wobei die vom Roboter durchlaufenen Zwischenzustände $z \notin \boldsymbol{Z}$ nicht definiert sind. Die durch Steuerung zu realisierende Zustandsfolge soll ein Steuerungsziel $z^* \in \boldsymbol{W} \subset \boldsymbol{Z}$ erreichen, wobei $\boldsymbol{W}$ gegebenenfalls auch mehr als ein Element enthalten kann.
Zur Erzeugung von Zustandsübergängen können von der Steuereinrichtung Operationen $u \in \boldsymbol{U}$ ausgegeben werden, die i. allg. zustandsabhängig beschränkt sind. Diese betätigen die Achsantriebe bzw. das Handhabungsobjekt. Die Ermittlung des (Ist-) Zustandes zur Rückmeldung an die Steuerung erfolgt mit Hilfe geeigneter Merkmale x_i. Dazu werden die durch die Ausführung des kinematischen und Handhabungsteils festgelegten Koordinaten und Stellungen verwendet, die durch geeignete Meßglieder für Wege und Winkel (z. B. Kode- oder Inkrementalgeber) bzw. Initiatoren erfaßt werden können. Ihre Zusammenfassung ergibt den Meßvektor $\boldsymbol{x}$, dessen Dimensionalität wesentlich von der Anzahl der Freiheitsgrade des Roboters bestimmt wird. Die Abbildung der Zustände z auf die Beobachtungen x kann beim Roboter meist als eindeutig vorausgesetzt werden. Damit entsprechen den relevanten Zuständen $z \in \boldsymbol{Z}$ ebenfalls relevante Beobachtungen $x \in \boldsymbol{X}$. Das gewünschte Verhalten eines punktgesteuerten Roboters läßt sich somit durch einen Moore-Automaten beschreiben:

$$\boldsymbol{U}, \boldsymbol{Z} \to \boldsymbol{Z}$$
$$\boldsymbol{Z} \to \boldsymbol{X}. \qquad (1)$$

Die Funktion der Steuereinrichtung kann ebenfalls durch Abbildung von Mengen dargestellt werden. Ist jeder relevanten Beobachtung $x \in \boldsymbol{X}$ stets die gleiche Steueroperation $u \in \boldsymbol{U}$ zuzuordnen, so gilt

$$\boldsymbol{X} \to \boldsymbol{U}. \qquad (2)$$

Besteht hingegen die Notwendigkeit, die Zuordnung von der Reihenfolge der Beobachtungen abhängig zu machen, so muß die Steuereinrichtung in der Lage sein, selbst eigene Zustände $q \in \boldsymbol{Q}$ zu bilden. Die Steuerungsfunktion erfordert dann eine Beschreibung gemäß

$$\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Q} \to \boldsymbol{Q}$$
$$\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Q} \to \boldsymbol{U}. \qquad (3)$$

Das allgemeine Signalflußbild der betrachteten Klasse diskreter Steuerungsprobleme zeigt Bild 1.

2. Lernfähige diskrete Steuerungen

Es werde nun der Standpunkt bezogen, daß die zum Entwurf der Steuereinrichtung nötigen Informationen über das Steuerungsobjekt bzw. die Umgebung nicht hinreichend sind. Damit kann die Steuerungsfunktion (2) bzw. (3) nicht festgelegt werden. Ein Weg zur Überwindung dieses Mangels besteht in der Anwendung des Lernens. Dieses bewirkt, daß die anfänglich vorhandenen unvollständigen A-priori-Informationen (z. B. Nebenbedingungen, Regeln, gewisse Umgebungseigenschaften) während des Betriebs des Systems durch Auswertung laufender Informationen, die man durch Beobachtung der Umgebung gewinnt, ergänzt werden. Für unsere Zwecke verstehen wir unter Lernen einen Prozeß der schrittweisen Erarbeitung einer Zuordnungsvorschrift zwischen erfaßbaren laufenden Informationen einer anfangs unbekannten und/oder zeitvarianten Umgebung und den realisierbaren Operationen, so daß diese einem Optimalkriterium genügen [2]. Spezifische Merkmale des Lernens sind insbesondere der sofortige Zugriff auf erlernte Verhaltensweisen sowie eine gewisse Generalisierungsfähigkeit. Höhere Lernformen zeichnen sich außerdem durch eine lernzustandsabhängige Verbesserung der Strategie aus.
Lernfähige Steuereinrichtungen benötigen zusätzlich einen Meta-Algorithmus, der hier Lernalgorithmus genannt wird. Dieser bewirkt einen Lernprozeß, in dessen Verlauf Erfahrungen bezüglich des Steuerverhaltens übertragen oder erworben werden. Ihre Auswertung führt zur zielgerichteten Verbesserung des Steuerverhaltens. Dabei wird die anfängliche Unorganisiertheit, d. h. fehlerhafte bzw. regellose Funktion der Steuereinrichtung, in eine zunehmende Organisiertheit überführt. Das angestrebte Lernziel besteht somit in der selbsttätigen Ermittlung bzw. Spezifikation der gesuchten Steuerungsfunktion.
Nach der Art der während des Lernprozesses zugeführten laufenden Informationen können die nachfolgend charakterisierten Typen lernfähiger Steuereinrichtungen unterschieden werden:

a) trainierbare Steuereinrichtungen (TSE)
Entsprechend dem im Bild 2 veranschaulichten Lernsystem existiert eine äußere Einrichtung (Master, Lehrer), die eine Folge von Realisierungen der gewünschten Steuerungsfunktion erzeugt, deren Gesetzmäßigkeit nicht explizit bekannt

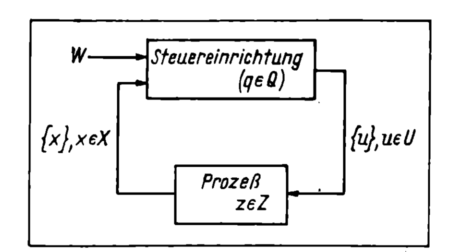


Bild 1. Diskretes Steuerungsproblem

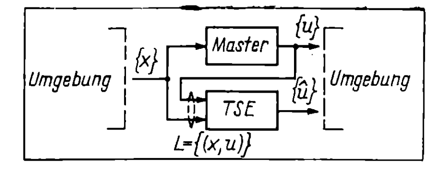


Bild 2. Lernsystem für trainierbare Steuereinrichtungen (TSE)

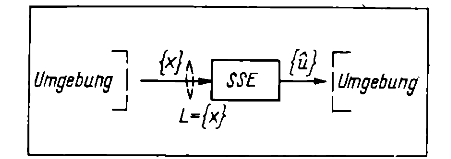


Bild 3. Lernsystem für selbstlernende Steuereinrichtungen (SSE)

[1]) Prof. Dr. sc. techn. *Wolfgang Weller* (48) studierte von 1953 bis 1959 Regelungstechnik an der TH Dresden. Anschließend im Institut für Regelungstechnik Berlin tätig. 1966 Promotion A. Von 1966 bis 1967 Dozent und Berater am Higher Institute for Electronics in Menouf/Arabische Republik Ägypten. Dabach wieder im Institut für Regelungstechnik Berlin tätig und gleichzeitig Lehrbeauftragter an der WPU Rostock. 1970 Berufung zum ordentlichen Professor für Technische Kybernetik an die Sektion Elektronik der Humboldt-Universität zu Berlin. 1973 Promotion B. Derzeitig als Wissenschaftsbereichsleiter tätig.

zu sein braucht. Die Funktionsrealisierungen bilden eine Folge von Relationen

$$L(j) = \{(x(j), u(j))\}, \quad (4)$$

die Lernfolge heißt. Diese wird der trainierbaren Steuereinrichtung zugeführt. Die Auswertung übernimmt ein Lernalgorithmus. Dabei wird die Steuerfunktion schrittweise entwickelt und jeder Beobachtung $x(j) \in \boldsymbol{X}$ eine Operation $\hat{u}(j) \in \boldsymbol{U}$ zugeordnet. Im Verlauf des Lernprozesses konvergiert die erzeugte Folge $\{\hat{u}(j)\}$ gegen die korrekte Ausgabe $\{u(j)\}$ des Masters. Der Trainingsprozeß kann im Open-loop-Betrieb oder Closed-loop-Betrieb durchgeführt werden.
Das Prinzip der trainierbaren Steuerung verwirklicht die auch im täglichen Leben sehr effiziente Methode der Übertragung fremder Erfahrungen.

b) selbstlernende Steuereinrichtungen (SSE)
Der lernfähigen Steuereinrichtung werden hier keine Mitteilungen über die zu erlernende Steuerfunktion zugeführt (Bild 3). Die Lernfolge hat somit die Form

$$L(j) = \{x(j)\}. \quad (5)$$

Um unter diesen Umständen zur Entwicklung einer Steuerungsfunktion zu gelangen, ist Selbstlernen notwendig. Zur Bildung eigener Erfahrungen wird am Steuerungsobjekt in zulässiger Weise gezielt experimentiert. Die Optimierung auf der Basis eines Gütevergleichs wird zweckmäßig am ermittelten Steuerungsmodell durchgeführt und führt zur schrittweisen Erarbeitung der optimalen Steuerung.

3. Trainierbarer Steueralgorithmus

Wie aus den Erörterungen von Abschn. 1. hervorgeht, handelt es sich bei der Steuerung von Industrierobotern um Probleme hoher Dimensionalität. Soll die Steuerung lernfähig gestaltet werden, so kommen daher Lösungen auf der Basis lernfähiger Erkennungssysteme bzw. lernfähiger Automaten nicht in Betracht. Es wurde statt dessen eine Lösung entwickelt, die auf der Bildung und Verarbeitung von Wortnetzen beruht und besonders für die Implementierung durch Mikrorechner mit Wortverarbeitung geeignet ist. Die entsprechenden Grundlagen sind in [3] dargestellt. Die wesentlichen Merkmale der Lösung sind:

- Aufspaltung des Meßvektors $\boldsymbol{x}$ und Stellvektors $\boldsymbol{u}$ in Teilvektoren $\boldsymbol{x}_i^l$, $i = 1(1)\,p$ und $\boldsymbol{u}_j^l$, $j = 1(1)\,q$ entsprechend der verfügbaren Wortbreite l
- Erfassung der relevanten Belegungen $x \in \boldsymbol{X}$ bzw. $u \in \boldsymbol{U}$ durch Verkettung der entsprechenden Belegungen x_i bzw. u_j der Teilvektoren (Wortketten)
- durch Elimination mehrfach auftretender Belegungen x_i bzw. u_j Aufbau von Wortnetzen, die entsprechend der vorliegenden Zuordnung miteinander verknüpft werden (Assoziation)
- Beschreibung des Eingangs- und Ausgangswortnetzes durch je einen gerichteten Graphen mit bewerteten Kanten D_x und D_u sowie der Assoziationen durch einen ungerichteten Graphen $\boldsymbol{G}$, der Endknoten von D_x und D_u miteinander verbindet (Steuergraph)
- Freie Vergabe der Knoten $v \in \boldsymbol{V}$ durch den Lernalgorithmus
- Abspeicherung der gewichteten Kanten $e = ('v, v)_{x \vee u}$ in der Weise, daß v zugleich als Adresse dient, unter der das Kantengewicht x_i bzw. u_j und der Vorgängerknoten $'v \in \boldsymbol{G}(v)$ abgespeichert werden (verkettete Listen).

Eine inzwischen vorgenommene Weiterentwicklung ermöglicht die selbsttätige Bildung von Zuständen und Wartezeiten. Damit läßt sich der trainierbare Steueralgorithmus auch für die direkte Teach-in-Programmierung von Industrierobotern einsetzen.

4. Selbstlernender Steueralgorithmus

Es wurde ein selbstlernender und -optimierender Steueralgorithmus entwickelt, der in seiner derzeitigen Form zum Erlernen und Verifizieren optimaler Zuordnungen vom Typ (2) geeignet ist. Er ermöglicht, von jedem Zustand (Beobachtung) $x \in \boldsymbol{X}$ aus einen Zustand $x^* \in \boldsymbol{W}$ des Zielgebiets $\boldsymbol{W} \subset \boldsymbol{X}$ zu erreichen, das fest vorgegeben ist. Besonderer Wert wurde auf das Auskommen mit geringer A-priori-Information sowie auf das Erkunden und zukünftige Vermeiden zyklischer Zustandsfolgen gelegt. Die Grundzüge des weitgehend heuristischen selbstlernenden Steueralgorithmus mit lernabhängiger Strategie sind in [4] dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung wird in [2] gegeben.
Die entwickelte Lösung ist durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Die benötigten A-priori-Informationen umfassen die Angabe der Operationen $\boldsymbol{U}$, der Zielbedingungen $\psi_k(\ldots, x_i, \ldots)$ und bei nicht sensorgeführten Systemen auch der Nichtzulässigkeitsbedingungen $\varphi_k(\ldots, x_i, \ldots)$
- Zyklen 0. und 1. Ordnung werden bei ihrem erstmaligen Auftreten erkannt und ihr Durchlauf zukünftig unbedingt oder bedingt vermieden, Zyklen höherer Ordnung unterdrückt der Optimierungsalgorithmus
- Die Optimierung erfolgt nach dem Kriterium kürzester Folgen nach dem Prinzip des sogenannten minimalen Knotenrangs, i. allg. nach Erreichen eines Zustandes des Zielgebiets, wenn bei der durchlaufenden Lernfolge mindestens ein Lernvorgang stattgefunden hat
- Der Algorithmus verfügt über die Strategien „zulässige Steuerung“, „vorwärtsweisende Steuerung“, „Erkundung“ und „optimale Steuerung“, zwischen denen nach einem festliegenden Hierarchiekonzept umgeschaltet wird
- Die Beschreibung des Steuerungsmodells ist graphenorientiert, wobei die Zykluserkennung und Optimierung am Graphen vorgenommen werden
- Die als Erfahrungen erworbenen Informationen unterschiedlichen Aufbereitungsgrades werden in gesonderten Speicherbereichen aufbewahrt, wobei das Prinzip der verketteten Listen Verwendung findet.

5. Anwendungsbeispiele

Nachfolgend werden zwei bewußt sehr einfach gewählte Beispiele angegeben, die Anwendungsmöglichkeiten der hier dargelegten Arten lernfähiger diskreter Steuerungen für Industrieroboter illustrieren sollen.

5.1. Trainierbarer Schweißroboter

Betrachtet werde ein universell einsetzbarer PTP-gesteuerter Schweißroboter, dessen Belehrung nach dem Prinzip des direkten Teach-in vorgenommen werden soll. Die durch manuelles „Vorfahren“ erzeugte Bewegungs- und Aktionsfolge ist im Bild 4 dargestellt. Es soll der Lern- und Steueralgorithmus nach Abschn. 3. verwendet werden. Die Eingangswortkette $\mathbf{x}$ besteht im vorliegenden Fall aus $p = 4$ Worten der Wortlänge l. Darin erfassen die ersten beiden Worte die kodierten Positionskoordinaten $p(x, y)$, das 3. Wort den aktuellen Zustand (Bewegung, Handhabungsobjekt) und das 4. Wort die kodierte Zeit, die selbsttätig gebildet wird. Die Ausgangswortkette u besteht im betrachteten einfachen Fall nur aus einem Wort. Seine Komponenten dienen zur Ansteuerung der Servoantriebe und zur Betätigung des Werkzeuges.
Der erlernte Steuergraph enthält $[v] = 35$ Knoten und $[e] = 45$ Kanten. Seine Abspeicherung in Form von Doppelworten erfordert mit 47 byte nur sehr wenig Speicherplatz.

5.2. Selbstlernender mobiler Roboter

Mit dem entwickelten selbstlernenden und -optimierenden Steueralgorithmus nach Abschn. 4. soll ein mobiler Roboter, der über einen in Bewegungsrichtung wirkenden Sensor verfügt, ausgerüstet werden. Dieser bewegt sich in unbekannter Umwelt, wobei bestehende Hindernisse zu umgehen sind (Bild 5). Es ist eine definierte Position p_W zu erreichen, in der eine Aktion a_W ausgeführt werden soll. Das Lernziel besteht im Erwerb eines Verhaltens, das den Roboter befähigt, von jedem Zustand aus, den er einnehmen kann, in kürzester Folge $\{x\}$ das Ziel $\boldsymbol{W}$ zu erreichen.
Der vom selbstlernenden Steueralgorithmus ausgewertete Meßvektor $\boldsymbol{x}$ enthält als Komponenten die Koordinaten der Posi-

Bild 4. Beispiel eines Bewegungs- und Aktionsdiagramms für Schweißroboter

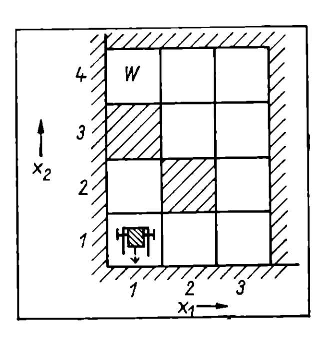


Bild 5. Mobiler Roboter in unbekannter Umgebung

tion und Orientierung des Roboters und den Arbeitszustand des Handhabungsobjekts. Zur Menge U der Operationen gehören die Operationen zur Drehung und Vorwärtsbewegung des Roboters, zur Betätigung des Handhabungsobjektes sowie die leere Operation. Die Ausführung nicht zulässiger Operationen wird durch das Sensorsignal verhindert. Der erlernte Steuergraph besteht aus $[v] = 40$ Knoten. Der bei Abschluß des Lernprozesses erhaltene optimale Steuerbaum enthält 45 Kanten und ergibt einen dementsprechend geringen Speicherbedarf.

Zusammenfassung

Es werden je eine rechnerimplementierbare Lösung für trainierbare und selbstlernende diskrete Steuerungen dargelegt, die sich durch geringen Speicherbedarf sowie hohe Lerneffektivität und Zielstrebigkeit auszeichnen. Ihre Anwendungsmöglichkeit in Industrierobotern der 2. und 3. Generation wird anhand von Beispielen illustriert.

Literatur

[1] msr — Fortsetzungsreihe „Industrierobotersteuerungen". Ab: msr 25 (1982) 9.

[2] *Weller, W.*: Lernfähige Steuerungen. Berlin: VEB Verlag Technik (in Vorbereitung).

[3] *Weller, W.*: Trainierbare Steuereinrichtung — ein neues Mikrorechnerkonzept zur Implementierung von Binärsteuerungen. msr 23 (1980) 2, S. 62—65.

[4] *Weller, W.*: Aufbau und Einsatz selbstlernender Systeme zur Steuerung technologischer Prozesse. Wiss. Zeitschr. der Humboldt-Universität zu Berlin, Math.-Nat. R. XXVII (1978) 2, S. 175—180.

msr 7990

P. Kopacek[1])

Dynamisches Verhalten von pneumatisch angetriebenen Handhabungsgeräten

0. Einleitung

Unter Handhabungsgeräten sollen im folgenden sowohl festprogrammierte Manipulatoren (Einlegeeinrichtungen, Ladeeinrichtungen) als auch flexibel programmierte Manipulatoren (Industrieroboter) verstanden werden. Beide Bauformen werden in letzter Zeit in immer stärkerem Maße industriell eingesetzt. Gründe dafür sind die steigenden Lohnkosten, das beschränkte Arbeitskräftepotential, die Forderung nach einer gleichbleibenden Produktqualität und die Humanisierung der Arbeitsplätze. Nach neueren Untersuchungen sind ungefähr 20% der eingesetzten Geräte pneumatisch angetrieben, wovon ein Großteil festprogrammierte Manipulatoren sind. Pneumatische Antriebe bestehen aus einem elektrisch betätigten Servoventil (Wegeventil), das über entsprechende Leitungen auf einen Pneumatikzylinder wirkt.

Die Antriebe bestimmen wesentlich das dynamische Verhalten der Handhabungsgeräte. Regelungstechnisch handelt es sich dabei um hochnichtlineare Systeme, deren mathematische Modelle dementsprechend kompliziert anzusetzen sind.

Für praktische Anwendungen sind jedoch überschaubare Modelle, die geringen Rechenaufwand erfordern, notwendig.

Es sollen daher im Hinblick auf Handhabungsgeräte einfache, aber doch hinreichend genaue Modelle für pneumatische Antriebe erstellt und ihre Gültigkeit überprüft werden.

1. Modell eines pneumatischen Antriebes

Regelungstechnisch gesehen handelt es sich bei dem Antrieb einer Achse eines Handhabungsgerätes um ein Übertragungsglied mit einer elektrischen Spannung u_{el} als Eingangssignal und einer Kraft F_{Dr} oder einem Moment M_{Dr} als Ausgangssignal. Diese Kraft oder dieses Moment bewirkt an der entsprechenden Achse des Handhabungsgerätes eine Schubbewegung (Weg a, Geschwindigkeit $\dot{a}$, Beschleunigung $\ddot{a}$) oder eine Drehbewegung (Winkel α, Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}$, Winkelbeschleunigung $\ddot{\alpha}$).

Bild 1 zeigt schematisch einen elektropneumatischen Linearantrieb. Das elektrische Eingangssignal u_{el} betätigt ein pneumatisches Wegeventil, dessen Stellung die Drücke p_1 und p_2 in den Zuleitungen zu den Kammern des Pneumatikzylinders beeinflußt. Die sich in den Kammern aufbauenden Drücke p_1 und p_2 bestimmen über die Zylinderflächen A_1 und A_2 die wirkende Kraft F_{Dr}.

Für den inkompressiblen Fall eines elektrohydraulischen Servoantriebes sind die Gleichungen für das dynamische Verhalten beispielsweise in [1] abgeleitet. Sie können unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft mit den Voraussetzungen

- das System ist starr
- keine Leckverluste
- lineare Durchflußcharakteristik des Servoanteiles
- Versorgungsdruck p_0 und Rückdruck p_R konstant
- Zustandsänderungen in den Leitungen isotherm und in den Zylinderkammern adiabatisch

für einen elektropneumatischen Antrieb adaptiert werden [2]. Mit den Zustandsgrößen

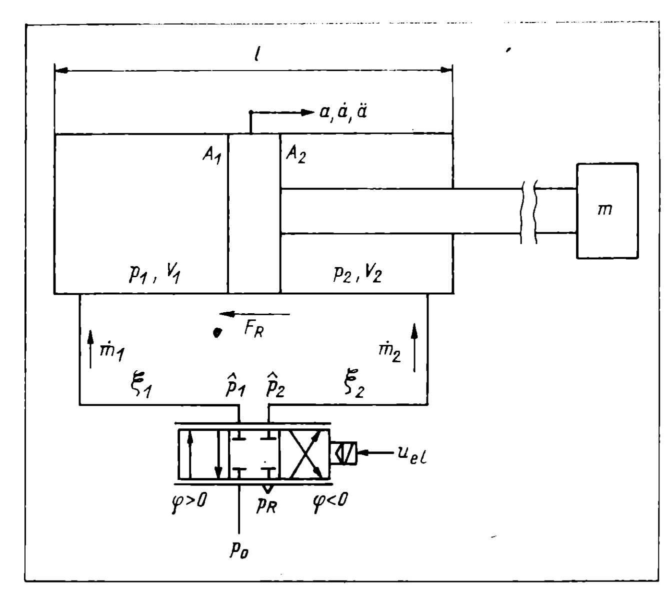


Bild 1. Schema des elektropneumatischen Linearantriebes

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \varphi \qquad x_3 = p_1/p_0 \qquad x_5 = a/l \\ x_2 &= \dot{\varphi} \qquad x_4 = p_2/p_0 \qquad x_6 = \dot{a}/l \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

und den Konstanten

$$\left.\begin{aligned} &\alpha_1 = \frac{\sqrt{2}\ \dot{m}_0}{A_1 \varrho_0 l}, \qquad \alpha_2 = \frac{a_1 A_1}{A_2}, \qquad \beta = \frac{A_1 p_0}{ml}, \\ &\gamma = \frac{A_2 p_0}{ml}, \quad \delta = \frac{f}{m}, \quad \varepsilon = \frac{F_0}{ml}, \quad \mu = \frac{F_H}{ml}, \quad \nu = cl \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

folgt das System von 6 nichtlinearen Differentialgleichungen 1. Ordnung für das dynamische Verhalten des Antriebes:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -2D\omega_0 x_2 - \omega_0^2 x_1 + \omega_0^2 \frac{V}{\Phi_{max}} u_{el} \\ \dot{x}_3 &= \frac{\varkappa}{0{,}5 + x_5} x_3 \left\{ \frac{\alpha_1 x_1}{x_3^{1/\varkappa}} \left[\Big| 0{,}5(1 + \operatorname{sgn} x_1) + \right.\right. \\ &\left.\left. + 0{,}5 \frac{p_R}{p_0} (1 - \operatorname{sgn} x_1) - \eta_1 \dot{m}_1^2 \operatorname{sgn} \varphi - x_3 \Big| \right]^{1/2} - x_6 \right\} \\ \dot{x}_4 &= \frac{\varkappa}{0{,}5 - x_5} x_4 \left\{ \frac{-\alpha_2 x_1}{x_4^{1/\varkappa}} \left[\Big| 0{,}5(1 - \operatorname{sgn} x_1) + \right.\right. \\ &\left.\left. + 0{,}5 \frac{p_R}{p_0} (1 + \operatorname{sgn} x_1) + \eta_2 \dot{m}_2^2 \operatorname{sgn} \varphi - x_4 \Big| \right]^{1/2} + x_6 \right\} \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \beta x_3 - \gamma x_4 - \delta x_6 - [\varepsilon + 0{,}5 \operatorname{sgn} x_6 + \\ &\quad + \mu \exp(-\nu |x_6|) \operatorname{sgn} \dot{x}_6] \cdot \operatorname{sgn} x_6 . \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

---

[1]) (siehe Beitrag „Mikrorechner zur Automatisierung maschinenbaulicher Prozesse" auf S. 35 des Heftes 1/1984)

Die eigentliche Ausgangsgröße — die Antriebskraft F_{Dr} — ergibt sich aus (1) und (2):

$$F_{Dr} = A_1 p_1 - A_2 p_2 = ml(\beta x_3 - \gamma x_4) - F_R \,. \tag{4}$$

Die Reibungskraft wird durch den Ansatz

$$F_R = \begin{cases} flx_6 + [F_0 + F_H \exp(-c/lx_6)] \operatorname{sgn} x_6 & \forall \operatorname{sgn} x_6 = \operatorname{sgn} \dot{x}_6 \\ flx_6 + F_0 \operatorname{sgn} x_6 & \forall \operatorname{sgn} x_6 = -\operatorname{sgn} \dot{x}_6 \end{cases} \tag{5}$$

als Summe eines geschwindigkeitsproportionalen Anteiles flx_6, eines Coulombschen Anteiles F_0 und eines Haftreibungsanteiles $F_H \exp(-c/lx_6)$ berücksichtigt.

2. Modellvereinfachungen

Dieses umfassende und sehr exakte Modell ist jedoch für viele praktische Anwendungen zu kompliziert, weshalb in den meisten Fällen Vereinfachungen unumgänglich notwendig sind. Aus physikalischen Überlegungen folgt unmittelbar:

- Da die Zeitkonstante des Servoventils, das als PT2-Glied angenommen wurde, sehr klein ist, kann dieses als P-Glied angesetzt werden
- Die Druckverluste in den Leitungen zwischen Servoventil und Zylinder sind vernachlässigbar ($\hat{p}_1 = p_1$, $\hat{p}_2 = p_2$)
- Die Kolbenreibung wird nur proportional der Geschwindigkeit angenommen.

Diese in der Praxis vertretbaren Vereinfachungen führen auf das nichtlineare Modell 4. Ordnung in Form der Zustandsgleichungen

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0 \\ \dot{x}_2 &= 0 \\ \dot{x}_3 &= \varkappa \frac{x_3}{0,5 + x_5}\left[\alpha_1 \frac{x_1}{0,1 + x_3}\sqrt{|1 - x_3|} - x_6\right] \\ \dot{x}_4 &= \varkappa \frac{x_4}{0,5 - x_5}\left[-\alpha_2 \frac{x_1}{0,1 + x_4}\sqrt{\left|\frac{p_R}{p_0} - x_4\right|} + x_6\right] \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \beta x_3 - \gamma x_4 - \delta x_6 \,. \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

In (4) ändert sich lediglich die Reibungskraft F_R (5) auf

$$F_R = flx_6 \,. \tag{7}$$

Eine weitere Vereinfachung aufgrund physikalischer Zusammenhänge ist auf rechnerischem Wege nicht mehr möglich. Außerdem kann aus (6) keine Eingangs-Ausgangsbeschreibung (z. B. Differentialgleichung 4. Ordnung) gewonnen werden.

3. Heuristische Modellvereinfachung aufgrund der Übergangsfunktion

Die Form der Übergangsfunktion $x_5(t)$ für eine sprungförmige Änderung der Eingangsspannung u_{el} des Servoventils (Bild 2) ist ähnlich jener eines Integralgliedes mit Verzögerung 1. Ordnung und Totzeit. Sie kann daher durch den entsprechenden Polygonzug, der im Bild 2 ebenfalls eingezeichnet ist, approximiert werden. Aus diesem können der Integrierbeiwert K_I des Integralgliedes, die Zeitkonstante T_1 des PT1-Gliedes und die Totzeit T_t des Totzeitgliedes abgelesen werden. Als Ausgangsgröße tritt hier allerdings nicht die „Drivekraft" F_{Dr}, sondern der normierte Weg auf. Dieser Approximation entspricht formelmäßig die Übertragungsfunktion

$$F(s) = \frac{K_I}{s} \cdot \frac{1}{1 + T_1 s} \exp(-T_t s) \,. \tag{8}$$

Die Übergangsfunktion und somit die Konstanten K_I, T_1 und T_t hängen von den Auslegungsparametern (z. B. A_1, A_2, p_0, p_R, l, m) ab. Diese Zusammenhänge könnten durch weitere Vereinfachung der Zustandsgleichungen (6) und Koeffizientenvergleich bestimmt werden. Infolge der Nichtlinearität der Gleichungen (6) ist dies aber nicht möglich.

Um trotzdem näherungsweise diese Zusammenhänge zu ermitteln, wurden ausführliche Hybridrechenuntersuchungen durchgeführt, die in [2] beschrieben sind.

Es wurde sowohl das „exakte" Modell (6) als auch das einfachste Modell (8) am Analogteil des Hybridrechners simuliert. Ein Vergleich mit gemessenen Übergangsfunktionen an einem Handhabungsgerät zeigt die hinreichende Genauigkeit des Modelles (6) [3]. Ausgehend von der Übergangsfunktion eines simulierten Servosystems mit den Konstruktionsparametern $m = 1$ kg, $l = 30$ cm, $A_1 = 7$ cm², $A_2 = 6{,}3$ cm², $p = p_R = 1$ bar und der Zeitkonstante $T = 0{,}04$ s sowie der Dämpfung $D = 0{,}7$ des Ventiles wurden diese entsprechend verschiedenen Antrieben geändert und die Übergangsfunktion des vereinfachten Modells

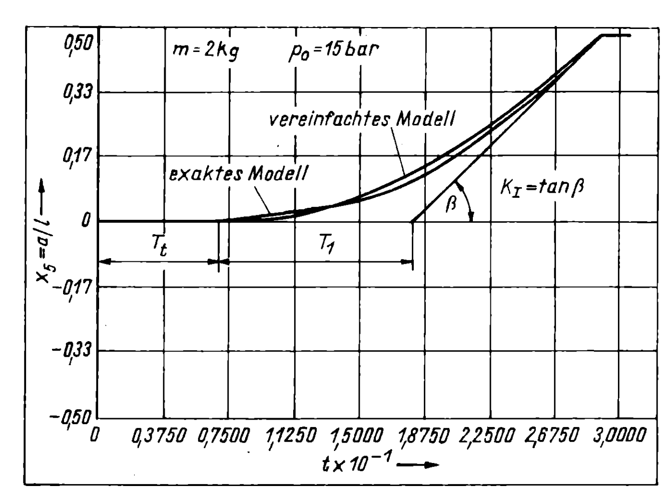


Bild 2. Übergangsfunktionen des exakten und einfachen Modells sowie deren Approximation

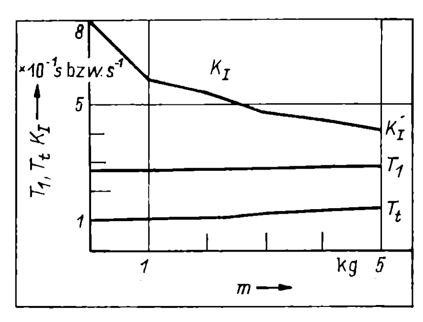


Bild 3. Abhängigkeit der Modellparameter T_1, T_t, K_I von der Last m

(8) durch Variation der Parameter K_I, T_1 und T_t optimal angepaßt (Bild 2).

Als Ergebnis erhält man Kurven, wie sie beispielsweise im Bild 3 dargestellt sind. Hier sind die Abhängigkeiten von K_I, T_1 und T_t von der Masse dargestellt. Während Totzeit T_t und Zeitkonstante T_1 nur geringfügig von der zu bewegenden Masse abhängen, sinkt K_I mit zunehmender Masse. Da K_I im wesentlichen die erreichte Endgeschwindigkeit des Zylinders darstellt, ist dies unmittelbar einzusehen. Ähnliche Diagramme ergeben sich für die anderen Konstruktionsparameter, wodurch die Möglichkeit besteht, für einen vorliegenden pneumatischen Servoantrieb unmittelbar die Modellparameter K_I, T_1 und T_t des vereinfachten Modells (8) zu bestimmen.

Zusammenfassung

Ein aus der Literatur bekanntes exaktes Modell eines elektrohydraulischen Antriebes für ein Handhabungsgerät wurde für einen elektropneumatischen Antrieb durch Berücksichtigung der Kompressibilität des Arbeitsmediums adaptiert. Da das sich ergebende Modell 6. Ordnung hoch nichtlinear ist, wurde versucht, dieses aufgrund physikalischer Zusammenhänge rechnerisch zu vereinfachen. In der Praxis gerechtfertigte Vereinfachungen führten auf ein nichtlineares Modell 4. Ordnung, dessen Anwendung für verschiedene regelungstechnische Problemstellungen noch immer zu aufwendig ist.

Aufgrund einer wohlbekannten Annäherung der Übergangsfunktion des pneumatischen Antriebes ergab sich die Möglichkeit, ein sehr einfaches lineares Modell 2. Ordnung zu erstellen. Es besteht aus der Serienschaltung eines Integralgliedes, eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung und eines Totzeitgliedes. Ein Problem war die Bestimmung der Modellparameter (K_I, T_1, T_t) aus den Konstruktionsparametern des Antriebes, die rechnerisch nicht möglich ist. Diese Zusammenhänge konnten mit Hilfe von Simulationen näherungsweise festgelegt werden. Es steht somit ein sehr einfaches, aber doch hinreichend genaues Modell für pneumatische Antriebe von Handhabungsgeräten zur Verfügung.

Literatur

[1] *Quetting, P.:* Entwurf eines Zustandsbeobachters für elektro-hydraulische Servosysteme. Interner Forschungsbericht 6/79 des Instituts für Meß-, Steuer- und Regelungstechnik der GH Duisburg, 1979.

[2] *Desoyer, K.; Kopacek, P.; Troch, I.:* Simulation of an electropneumatic drive for Industrial Robots. Preprints of the IMACS-Symposium on "Simulation in Engineering Sciences", Nantes 1983, pp. 392–397.

[3] *Kopacek, P.:* Microcomputer Control of Manipulators and Assembling Machines. Preprints of the 8th IFAC-Congress, Kyoto 1981, Vol. XIV, p. XIV-49 to XIV-53.

msr 7957

D. Karastojanov, G. Natschev; B. Petkov[1])

Erweiterung einer Industrierobotersteuerung mit Möglichkeiten zur adaptiven Schweißnahtverfolgung [2])

0. Einleitung

Der Einsatz von Industrierobotern zur Automatisierung von Schweißprozessen führt zur Erhöhung der Qualität der Erzeugnisse und zur Steigerung der Arbeitsproduktivität. Beim Lichtbogenschweißen entstehen aber Probleme, die eng mit den Besonderheiten dieses Prozesses verbunden sind. Es ist bekannt, daß Roboter eine Schweißverbindung durch Bewegungen zwischen Stützpunkten mit gleichzeitiger Steuerung des Technologieprozesses realisieren. Dieser Vorgang geschieht in einem Arbeitsbereich, der durch die konkrete Werkstückkonfiguration und die zu bearbeitenden Schweißnähte gekennzeichnet ist. Als Grundlage einer nichtadaptiven Steuerung dienen Vermutungen über bestimmte Umgebungsparameter. Wegen Herstellungstoleranzen und ungenauer Positionierung sowie Wärmeverzug während des Schweißens werden jedoch diese Parameter meistens nicht eingehalten. Für kleine Abweichungen vom Modell, auf dessen Basis die Programmierung des Roboters durchgeführt wurde, ist die Steuerung passiv adaptierbar. Im Falle des Lichtbogenschweißens dürfen die maximalen Abweichungen nicht größer als ein Elektroden-Durchmesser sein. Anderenfalls ist die qualitätsgerechte Realisierung der Schweißnähte nur mit einer Adaption bezüglich der Geometrieabweichung mittels Korrektur der Bahn bzw. der Lichtbogenparameter möglich [1].

1. Anforderungen an die Sensorik

Der Mangel an verbindlichen Informationen für die Lage und Konfiguration des zu bearbeitenden Werkstückes wird durch Beobachtungen unmittelbar vor der Aufgabenerfüllung bzw. während der Arbeit ergänzt. Für diesen Zweck werden verschiedene Methoden und Mittel in Form von Signalsendern und -empfängern mit der dazugehörigen Soft- und Hardware verwendet. Einige der bekannten physikalischen Effekte sind jedoch für Schweißroboter nicht verwendbar oder es bestehen Realisierungsschwierigkeiten. Die Grundanforderungen sind hier folgende:

- Der Vorgang soll nicht zerstörend auf das Werkstück wirken und keine Spuren beim Messen hinterlassen.
- Die Bearbeitung soll nicht gestört oder erschwert werden.
- Die gemessene Signalgröße soll mit repräsentativen Parametern definierbar sein.
- Die Realisierung soll nicht an komplizierte oder teure Geräte gebunden sein.

Diese Anforderungen sind auch für das Sensorsystem gültig. Außerdem bestehen aber noch folgende Probleme, die den Signalsender wie den -empfänger betreffen:

- Der Sensor soll einerseits in der Nähe des Arbeitsbereiches aufgestellt werden, damit die Arbeit nicht gestört und eine aktuelle Beobachtung ermöglicht wird.
- Andererseits soll der Sensor einen größeren Abstand zum Arbeitsbereich haben, um ihn zu schonen.
- Durch eine feste Kopplung zum System wird die Meßgenauigkeit erhöht.
- Der Sensor soll einen zusätzlichen Freiheitsgrad haben, um ein größeres Aufgabenspektrum zu erfassen [3].

2. Sensorsysteme für Schweißroboter

Als physikalische Grundlage des Meßvorganges dienen meistens gerichtete elektromagnetische Strahlungen, Fluidströme, die elektrischen Lichtbogenparameter, mechanische Kontakte u. a. Als Quelle des Meßsignals können direkt der Lichtbogen oder andere selbständige Sender verwendet werden. Es werden meistens Verhältnisse zwischen Signalen, für kurze Abstände (bis 10 mm) oder längere (über 10 mm) gemessen [3].

Einige der möglichen Realisierungen sind im Bild 1 dargestellt. Als Beispiele können mechanische Führungen, Mikroschalter, Induktionsgeber, Fernseh- oder CCD-Kameras u. a. aufgeführt werden.

Im Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften in Sofia wurde ein System zur Informationsgewinnung in der Umgebung der Schweißnaht entwickelt, das auf Messungen eines Signalgebers basiert, der im infraroten Lichtbereich für Abstände über 10 mm arbeitet. Die maßgebenden Vorteile dieser Lösung sind die geringen Störungen seitens des Lichtbogens in diesem Frequenzbereich sowie die Verfügbarkeit von nicht besonders teueren und komplizierten Halbleitersignalquellen (z. B. Laser). Es besteht weiterhin die Möglichkeit, genaue Messungen im Be-

Bild 1. Möglichkeiten von Sensorrealisierungen

	Verhältnis	Abstand < 10 mm	Abstand > 10 mm
Licht UV, normal	○ direkt / indirekt	d / i	d / i ○
Licht IR	○ d / i	d / i	d / i ○
Mikrowellen mm-cm	d / i	d / i	d / i ○
Rundfunkfrequenzen	d / i	d / i ○	d / i
R, L, C des Lichtbogens	○ d / i	d / i	d / i
R, L, C des Werkstücks	○ d / i	d / i ○	d / i
Ultraschall	d / i	d / i ○	d / i
pneumatische Effekte	d / i	d / i ○	d / i
mechanische Elemente	d / i	○ d / i ○	d / i
Radioaktivität	d / i ○	d / i	d / i

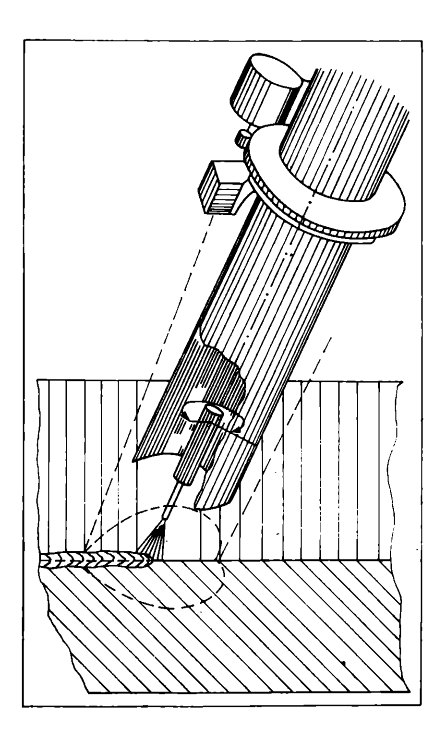


Bild 2. Struktur des Laser-Sensors

[1]) Dr.-Ing. *Georgi Natschev* (44) studierte von 1957 bis 1963 an der Hochschule für Maschinenbau und Elektrotechnik in Sofia. Von 1963 bis 1969 im Institut für Elektroindustrie Sofia tätig. Danach bis 1977 im Institut für Rechentechnik Sofia mit Arbeiten zur Mini- und Mikrorechner-Gerätetechnik. Seit 1977 im Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften, dort Leiter der Sektion Industrierobotersteuerungen. 1979 Promotion A.

Über die beiden Mitautoren, die im gleichen Institut tätig sind, liegen leider keine weiteren Angaben vor.

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrages lag in den Händen von Dipl.-Ing. *H.-H. Hiekel*, TU Dresden.

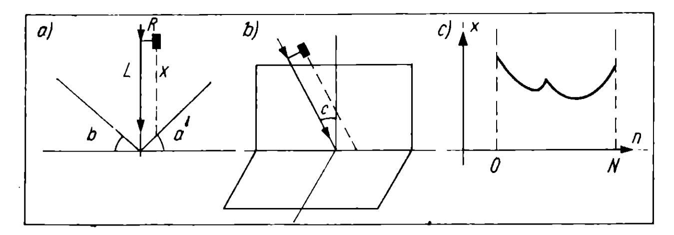


Bild 3. Prinzipbild des Laser-Sensors

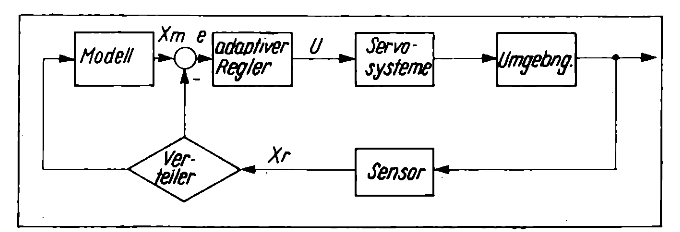


Bild 4. Adaptive Regelung

reich von 50—300 mm unter Verwendung eines CCD-Linienfeldes als Empfänger durchzuführen. Im Abtastbetrieb ist die Erzeugung eines dreidimensionalen Abbildes der Umgebung um den Brenner und die Schweißnaht möglich (Bild 2).

3. Adaptive Regelung im Rahmen der Industrierobotersteuerung

Die Mehrzahl der vorhandenen Industrieroboter, die Systemelemente mit adaptivem Verhalten besitzen, haben (verschieden graduiert) folgende Nachteile:

- Die konkrete Werkstück-Konfiguration bestimmt die Lage und den Aufbau des Sensors
- Die Methoden zur Korrektur sind nur auf einzelne Teilbeispiele zugeschnitten
- Die Bewegungsfreiheit des Brenners wird vom Sensor eingeschränkt
- Es wird meistens nur auf eine Art von Abweichungen (meist Translation) reagiert.

Im o. g. Institut sind dagegen eine Methode und eine Einrichtung entwickelt worden, die eine parallel zur herkömmlichen Programmsteuerung arbeitende adaptive Regelung realisieren [4]. Als Informationssignal wird der Abstand verwendet, der von einem Laser-Sensor gemessen wird. Dieser Abstand ist von den Parametern des Gebers und des konkreten Werkstückes abhängig (Bilder 3a und 3b). Im Abtastbetrieb wird ein dreidimensionales Abbild der Umgebung um die Schweißnaht unter Anwendung folgender Abhängigkeiten erreicht (Bild 3c):

$$x = A - B \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) - \sin\left(C\frac{2\pi n}{N}\right)$$

N Gesamtzahl der Messungen; n laufende Nummer der Messung
$A = L$; $B = R \cdot \tan c$;

$$C = \begin{cases} R \cdot \dfrac{\tan a}{\cos c} & \text{bei } n \leqq \dfrac{N}{2} \\ -R \cdot \dfrac{\tan b}{\cos c} & \text{bei } n > \dfrac{N}{2}. \end{cases}$$

Während des Teach-in-Betriebes wird ein Lagemodell von dem Werkstück und dem Brenner aufgestellt. Während des Schweißens wird eine Folge der gewünschten Parametergrößen für eine Reihe von Punkten um die Schweißnaht generiert, die mit den wirklich gemessenen verglichen werden. Die dabei erhaltenen Differenzen dienen der Erarbeitung von Korrekturen, die zur vorprogrammierten Bewegung summiert und weiter vom Servosystem abgearbeitet werden (Bild 4).

Der vorgestellte Algorithmus sichert eine Reaktion auf Translations- und Rotationsverschiebungen der zu schweißenden Werkstücke von der vorprogrammierten Lage wie auch bei Veränderung ihrer Konfiguration infolge der ungenauen Herstellung oder des Wärmeverzuges. Es sind auch Maßnahmen zur Verminderung der Störungen seitens des Lichtbogens oder infolge der rauhen Werkstückoberfläche getroffen worden [2].

Zusammenfassung

Das Hauptziel bei der Erweiterung der Robotereigenschaften durch adaptive Funktionen ist es, mit relativ wenig zusätzlichen Kosten qualitativ neue Möglichkeiten zu erreichen. Auf diese Weise werden Produktivität und Rentabilität wesentlich gesteigert. Die hier vorgestellte Einrichtung ist zum Einbau in robotisierten Schweißkomplexen aus der Reihe „ISATRON" vorgesehen. Die theoretischen Untersuchungen und die durchgeführten Experimente bestätigen die Vorteile dieses Konzeptes. Die Schweißbahnverfolgung ist für Abweichungen in den Grenzen bis zu 15 mm von der vorprogrammierten Lage stabil.

Literatur

[1] *Karastojanov, D. N.; Bonew, N.:* Geometrična adaptacija pri upravlene na robot za d-gova zavarka (Geometrische Adaption in der Steuerung von Lichtbogenschweißrobotern). Avtomatika i isčislitelna technika, Sofija (1981) 4, S. 49—53.

[2] *Angelov, A. S.; Karastojanov, D.; Natschev, G.:* Ustrojstvo za opredeljane položenieto na zavarjanite detajli sprjamo zavar-čnata gorelka (Einrichtung zur Lagebestimmung der zu schweißenden Werkstücke in bezug auf den Schweißbrenner). Erfindung der VR Bulgarien, Nr. 54-201, vom 18. November 1981.

[3] *Natschev, G. N.; Karastojanov, D.; Petkov, B.:* Otnossno sledene na ševa pri upravlenieto na roboti za elektrod-govo zavarjavane (Zur Schweißbahnverfolgung bei der Steuerung von Lichtbogenschweißrobotern). Zavarjavane (1982) 1, S. 13—15.

[4] *Kuropatkin, P. M.:* Optimalnye i adaptivnye sistemy (Optimale und adaptive Systeme). Moskva: Vysšaja škola 1980. msr 7995

G. Natschev; B. Bonev; D. Karastojanov; W. Christov[1])

Flexible Industrierobotersteuerung zur Automatisierung von Schweißprozessen [2])

0. Einleitung

In den letzten Jahren werden in zunehmendem Maße Industrieroboter zum Schutzgasschweißen eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist die hohe Flexibilität, die eine Anpassung an verschiedene Werkstückausführungen ohne mechanischen Umbau erlaubt. Weitere Vorteile, die einen verstärkten Einsatz beim Lichtbogenschweißen erwarten lassen, können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Konstante Schweißqualität
- Hohe Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse
- Steigerung der Arbeitsproduktivität durch ein Mehrschichtsystem
- Kurze Umrüstzeiten bei Werkstückänderungen
- Verbesserung der Arbeitsbedingungen durch Verminderung der beim Schweißen auftretenden Umweltbelastung.

Der Beitrag betrachtet die Struktur und die Wirkungsweise einer Industrierobotersteuerung zur Automatisierung von Lichtbogenschweißprozessen. Beschrieben wird der Roboter ISATRON RB 250 mit der Steuereinheit ISOMATIK RB 250 AA, entstanden im Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Elektroschweißen „E. O. Paton", Kiew/UdSSR, und dem Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik, Sofia.

1. Komponenten der Industrierobotersteuerung

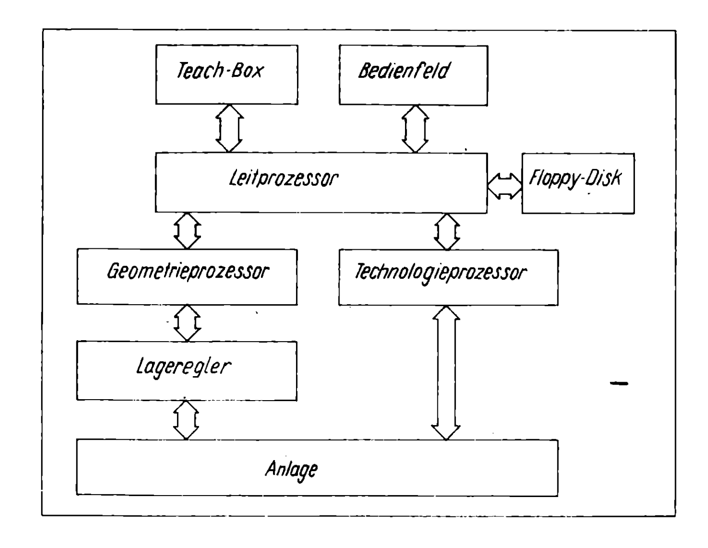
Die steigenden Anforderungen an die Positionier- und Bahngenauigkeiten und nach schnelleren Achsgeschwindigkeiten führen zu extremen zeitlichen Belastungen der Steuereinrichtung.

[1]) Dr.-Ing. *Georgi Natschev* (siehe S. 74 dieses Heftes).

Dr.-Ing. *Nikolay Bonev* (33) studierte 1969 an der Hochschule für Maschinenbau und Elektrotechnik Sofia und von 1970 bis 1974 an der TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Informationstechnik. 1976 bis 1980 Promotion A an der TH Karl-Marx-Stadt zu Fragen der Software-Entwicklung zur Steuerung technischer Prozesse mit Mikrorechner. Seit 1980 Tätigkeit am Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik Sofia, Sektion „Industrierobotersteuerungen".

Über die beiden weiteren Autoren, die am gleichen Institut tätig sind, liegen leider keine Angaben vor.

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrages wurde von Dipl.-Ing. *H.-H. Hiekel*, TU Dresden, ausgeführt.



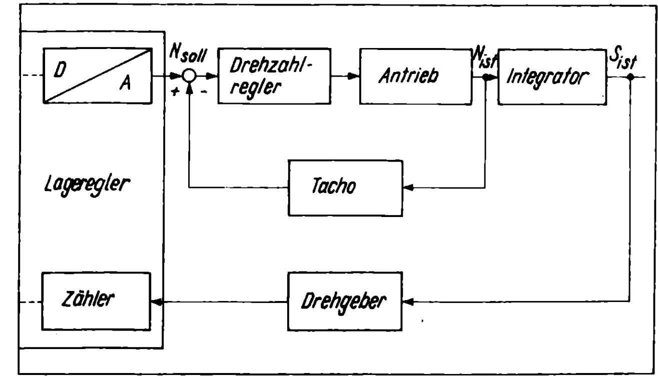


Bild 2. Lageregelkreisstruktur des Antriebssystems ▲

Bild 1. Struktur der Industrierobotersteuerung ISOMATIK RB 250

Als Lösung bietet sich die Anwendung eines Steuersystems an, das sich durch eine hohe Rechenleistung bei mehrfacher Verwendung vergleichsweise billiger Mikroprozessoren anstelle des Minirechners der konventionellen CNC-Steuerung auszeichnet. Die hardwaremäßige Anpassungsfähigkeit von Mehrprozessorsteuerungen hat den Vorteil, daß einzelne Elemente programmierbar sind und bei Bedarf die Gesamtkonfiguration verändert werden kann.

Aufgrund einer Analyse der Anforderungen bezüglich Leistung, Zuverlässigkeit, universeller Einsatzmöglichkeiten und modularer Bauweise wurde im Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik ein Mikrorechnersteuersystem für Industrieanwendungen, darunter ein erstes für Industrieroboter, entwickelt. Die Beschreibung und die Festlegung der Hardwareschnittstellen führte zur Ausarbeitung eines standardisierten mikroprozessorunabhängigen Bussystems (ISOMATIK-BUS). Es ermöglicht einen effektiven Datenaustausch zwischen den im System befindlichen Modulen, die durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet werden:

- Möglichkeiten zur Verwendung verschiedenartiger Bustreiber aufgrund der negativen Signal-Logik
- Erhöhte Störsicherheit durch leistungsfähige Bustreiber sowie hochohmige Busempfänger
- Die Anzahl der Adreßbus-Leitungen ist auf 16 festgelegt, womit ein Speicherbereich von 64 Kbyte adressierbar ist
- Der Datenbus kann ebenfalls auf 16 Leitungen erweitert werden und erlaubt dadurch den Einsatz von 8-bit- und 16-bit-Mikroprozessoren
- Das Interruptsystem kann wahlweise nach dem „Daisy Chain" — oder nach dem „Polling"-Prinzip realisiert werden.

Der Aufbau des Mikrorechnersystems ermöglicht einen schnellen und problemlosen Austausch sowie die Erweiterung der modularen Einheiten. Sie sind auf Doppel-Europakarten untergebracht und können über genormte 64- bzw. 96polige Steckverbinder mit dem Bus gekoppelt werden.

Die Industrierobotersteuerung ISOMATIK RB 250 AA besteht aus vier ähnlich aufgebauten Mikroprozessorsystemen auf der Basis der Mikroprozessorfamilie CM 600 (Bild 1). Die ersten drei davon sind in einem Schrank auf zwei 19-Zoll-Einschüben untergebracht und das vierte in einem weiteren Schrank zusammen mit der Schweißausrüstung.

Neben den für jedes Mikroprozessorsystem üblichen CPU-, RAM- und PROM-Platinen wurden auch entsprechende Interface-Module entwickelt und eingesetzt. Dazu gehören folgende Einheiten:

- Serielles Eingabe/Ausgabe-Interface zum Datenaustausch mit der Teach-Box, dem Bedienpult und dem zweiten Schrank
- FDC-Modul zur Steuerung von Mini-Floppy-Disk
- Echtzeit-Timer-Modul
- Dual-Port-RAM zur Realisierung des Datenaustausches zwischen den Mikroprozessorsystemen
- Servo-Steuerkarten mit Istwertzähler und D/A-Umsetzer zur Erzeugung des Geschwindigkeitssollwertes für die Antriebe.

Für die Inbetriebnahme des Mikrorechnersteuersystems wurde zusätzlich ein transportabler System-Tester aufgebaut. Mit seiner Unterstützung kann direkt am Arbeitsplatz eine Hardware- und Software-Analyse im On-line-Betrieb durchgeführt werden.

2. Software-Organisation

Das wesentliche Merkmal des Mikrorechnersteuersystems ist die hierarchische Struktur mit einer fließbandartigen Verarbeitung von Daten in Funktionsmodulen, denen NC-Funktionen fest zugeordnet sind. Der Schwerpunkt der Betriebsorganisation verlagert sich im Gegensatz zu Einprozessorsystemen auf die Verständigung der Prozessoren untereinander bezüglich des Fortgangs des funktionellen Steuerungsablaufes. Die Aufgaben beinhalten den Austausch benötigter Parameter und die Synchronisierung unterschiedlich schnell ablaufender Funktionen.

Der Leitprozessor übernimmt die zentralisierten Teile der Systemverwaltung, wie Systeminitialisierung, Umschaltung der einzelnen Betriebsarten sowie die Systemfehlerbehandlung. Die Bedienfunktionen zur Verarbeitung der Eingabedaten und zur Bereitstellung der Ausgabedaten, die hier an der Schnittstelle Steuerung — Mensch ablaufen, lassen Reaktionszeiten von mehreren 100 ms zu. Es können somit in diesem Mikroprozessormodul sehr komplexe, unterbrechbare Funktionen zusammen mit einigen schnellablaufenden Funktionen zusammengefaßt werden.

Das lokale Betriebssystem ermöglicht auf eine einfache Art und Weise den Aufbau eines Multi-Prozeß-Systems, wo die einzelnen Software-Module in PROMs untergebracht sind. Der Betriebssystemkern stellt die hardwarenächste, niedrigste Software-Konstruktionsebene dar. Er verwaltet, steuert und synchronisiert die durch Hardware- oder Software-Interrupts ausgelösten Programmprozesse. Ihr Ablauf wird über Listen entsprechend der Prozeßzustände gesteuert.

In der zweiten Konstruktionsebene sind Eingabe-/Ausgabe-Treiberroutinen eingebettet. Sie werden als Unterprogramme mit Parameterübergaben aufgerufen. Der Informationsaustausch mit dem Geometrieprozessor geschieht sehr schnell durch Zugriff auf den gemeinsamen Speicherbedarf. Zur Koordinierung wird der Zeit-Takt (6 ms) verwendet.

Die letzte, höchste Software-Konstruktionsebene bilden die anwendungsspezifischen Programme, wie Translator, Lader, Interpreter, Referenzpunktabgleich, Handsteuerung und Satzvorwahl. Sie werden entsprechend der geforderten Betriebsart (Referenzpunkt-Anfahren, Teach-in-Programm-Test, Automatik) gestartet. Die Erstellung des Schweißprogramms geschieht manuell durch Positionierung der Achsen von Hand. Dabei werden die Koordinatenwerte abgespeichert und NC-Sätze unter Verwendung von G- und M-Funktionen wie bei CNC-Werkzeugmaschinen (ISO-Kode) gebildet. Für die Programmierung der Schweißprozeß-Parameter werden einige Zusatzbefehle eingeführt. Der Interpreter führt dann die Abarbeitung in dem sogenannten "Look-ahead"-Betrieb aus. Auf diese Weise können die Interpolationsparameter für den nächsten Satz parallel zur laufenden Bewegung errechnet werden. Dazu wird eine Gleitkomma-Arithmetik mit 24 bit Genauigkeit benötigt.

Die Führungsgrößenerzeugung übernimmt der Geometrieprozessor. Entsprechend dem vom Leitprozessor erhaltenen Auftrag führt er die Berechnung der Bahnzwischenpunkte sowohl für die Linear- und Kreisinterpolation als auch beim Pendeln des Brenners längs oder quer zur Bewegungsrichtung aus. Weiterhin werden die notwendigen Koordinatentransformationen und die Umwandlung der Referenz-Koordinaten in robotereigene Koordinatenwerte unter Beibehaltung der Brennerorientierung bezüglich der Bahn durchgeführt. Zum Abgleich der während der Interpolation entstandenen Abweichung von der

Sollposition wird am Ende des Bahnabschnittes der programmierte Endpunkt direkt angefahren.
Der dritte Prozessor in dieser Hierarchie-Struktur übernimmt die Lageregelung. Er versorgt die nachgeschalteten fünf Eingabe-/Ausgabekarten (für je zwei Achsen), die D/A-Umsetzer zur Erzeugung des Geschwindigkeitssollwertes für die Gleichstromantriebe sowie Richtungsdiskriminatoren und Istwertzähler enthalten. Die prinzipielle Lageregelkreisstruktur ist im Bild 2 dargestellt. Auf diese Weise wird eine genügend hohe Genauigkeit mit vertretbarer Rechnerbelastung erreicht.
Der Technologieprozessor realisiert die Regelung der Schweißspannung und des Schweißstroms entsprechend der durch das Serien-Interface übermittelten Werte. Weiterhin wird auch der Drahtvorschub überwacht.

3. Kenndaten der Industrierobotersteuerung

Einige der wichtigsten Kenndaten der Industrierobotersteuerung im Rahmen des Roboters RB 250 können wie folgt zusammengefaßt werden (Bild 3):

● Anzahl der gesteuerten Achsen	9
davon des Roboters	5
davon des Arbeitstisches	2 × 2
● Verfahrweg je Achse:	
X (längs des Roboters)	2500 mm
Y (quer zum Roboter)	1250 mm
Z (vertikal)	630 mm
C (Drehen um eine Achse, parallel zu *Z*)	380°
D (Abweichung von der *C*-Achse)	0–110°
● Schweißgeschwindigkeit	7,2–72 m/h
● Transportgeschwindigkeit	170 mm/s
● Maximale Bahnabweichung	± 0,2 mm
● Drahtvorschubgeschwindigkeit	100–1000 m/h
● Schweißstrom	60–400 A
● Lichtbogenspannung	16–40 V
● Schweißdrahtdurchmesser	0,8–1,2 mm
● Frequenz des Brenner-Pendelns	0,2–2,0 Hz
● Amplitude des Pendelns	±1–7,5 mm.

Als Besonderheiten der vorgestellten Steuerung kann die Möglichkeit zur handgesteuerten Bewegung längs der Brennerachse erwähnt werden. Diese Option erweist sich während der Programmierung der Arbeitspunkte von Werkstücken mit komplizierter Konfiguration als sehr nützlich. Zum selben Zweck ist auch die Bewegung der *C*- und *D*-Achse so organisiert, daß bei der Veränderung der Brenner-Raumorientierung seine Spitze konstant bleibt. Außerdem ist die Möglichkeit zur dynamischen Veränderung wichtiger Technologieparameter des Schweißprozesses, wie Arbeitsgeschwindigkeit, Schweißstromstärke und Lichtbogenlänge, vorhanden (override).

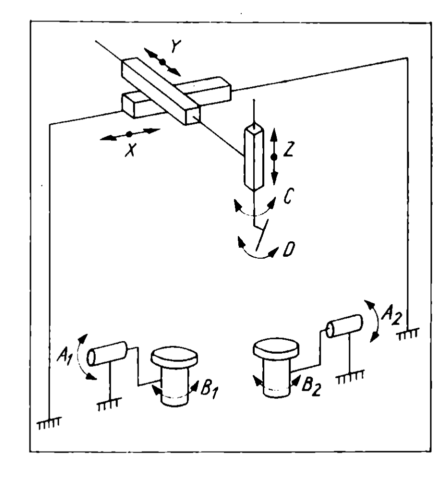


Bild 3. Kinematisches Ersatzbild des Industrieroboters RB 250

Zusammenfassung

Die dezentrale Organisation des vorgestellten Mehrprozessorsteuersystems läßt dem Entwickler die notwendige Bewegungsfreiheit beim Entwurf und bei der Realisierung der einzelnen Funktionseinheiten. Die Forderung nach Einhaltung der definierten Schnittstellen kann bei dem stufenweisen Ausbau oder der Verkleinerung durch eine eng begrenzte Anzahl von Änderungen meist auf dem Software-Gebiet realisiert werden. Es ist vorgesehen, eine Regelung zur adaptiven Schweißnahtverfolgung zu integrieren sowie eine Kopplung mit übergeordneten Rechnern zur Automatisierung von ganzen Produktionsabschnitten zu realisieren. msr 7996

St. Szyszko[1])

Effektivitätsvergleich von 3 alternativen Methoden zur vibroakustischen Diagnose des Verschleißzustandes einer Zahnradpumpe [2])

0. Einleitung

Lärm- und Schwingungsemission begleiten die Funktion aller Maschinen und mechanischen Anlagen. Das ist einerseits wegen der schädlichen Wirkung auf die Umwelt und das Bedienungspersonal nachteilig, andererseits tragen Schwingungen und Geräusche wesentliche Informationen über die Arbeitsweise der Anlagen und deren Verschleißzustand. Die vibro-akustische Diagnose (VAD) befaßt sich mit der Gewinnung von Informationen über den Objektzustand aus Schwingungs- und/oder Geräuschsignalen mit dem Ziel der

- Klassifizierung des Verschleißzustandes des Objekts
- Aufdeckung von Ursachen für Unzulänglichkeiten
- Vorhersage von ungünstigen oder unzulässigen Zuständen.

Das allgemeine VAD-Prinzip ist intuitiv klar und basiert auf der Annahme, daß der Charakter der Emission von Schwingungen und Geräuschen vom Qualitätszustand eines mechanischen Objektes (abhängig sowohl von der Qualität der Ausführung einzelner Bauelemente und deren Montage als auch, hervorgerufen durch Verschleißvorgänge, von der Betriebsdauer) bestimmt wird. Für diagnostische Anwendungen muß dieser Zusammenhang umkehrbar eindeutig sein, um bei bekanntem Zusammenhang aus dem Emissionscharakter auch auf den Objekt zustand schließen zu können. Die Mehrzahl der Arbeiten zur VAD (z. B. [3] bis [5]) betrachtet das Verhalten mechanischer Diagnoseobjekte anhand des spektralen Charakters der Emission von Schwingungen und Geräuschen. Die meisten Diagnosemethoden wählen daher Muster ausgewählter Verschleißzustände und Kriterien zum Vergleich mit diesen Mustern auf der Basis der spektralen Leistungsdichte. Andere, aus Messungen geschätzte spektrale Kenngrößen werden noch zur Verbesserung der Diagnosegenauigkeit herangezogen.

Bei der VAD sind folgende grundsätzliche Vorgehensweisen zu unterscheiden:

— Traditionelle Methoden: Ein Muster wird hier in Form einer oberen (und evtl. auch unteren) Grenzhüllkurve durch entsprechende Umformung einer (seltener mehrerer) spektralen Kenngröße gewonnen. Überschreitungen dieser Grenzhüllkurve werden auf wesentliche Veränderungen des Verschleißzustandes des Objekts zurückgeführt und die Ursachen dafür anhand eines für eine solche Vorgehensweise erforderlichen Diagnosemodells ermittelt (das Diagnosemodell beschreibt den kausalen Zusammenhang zwischen bestimmten Veränderungen des Verschleißzustandes des Objekts und den Veränderungen im spektralen Charakter der Emission von Schwingungen und Geräuschen. Vollständige Diagnosemodelle beschreiben diese Veränderungen sowohl im Frequenz- als auch im Amplitudenbereich. Vereinfachte Modelle, wie

[1]) Dr.-Ing. *Stefan Szyszko* (31) studierte von 1971 bis 1976 an der Feinmechanischen Fakultät der TH Warschau. Seit 1976 Tätigkeit als Technischer Ingenieur und ab 1979 als Oberassistent an der TH Warschau, Institut für Industrielle Automatisierungstechnik. 1982 Promotion auf dem Gebiet der Anwendung vibro-akustischer Methoden bei der Diagnostik von Maschinen und mechanischen Anlagen.

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrags wurde von Dr.-Ing. *S. Hauser*, TU Dresden, vorgenommen.

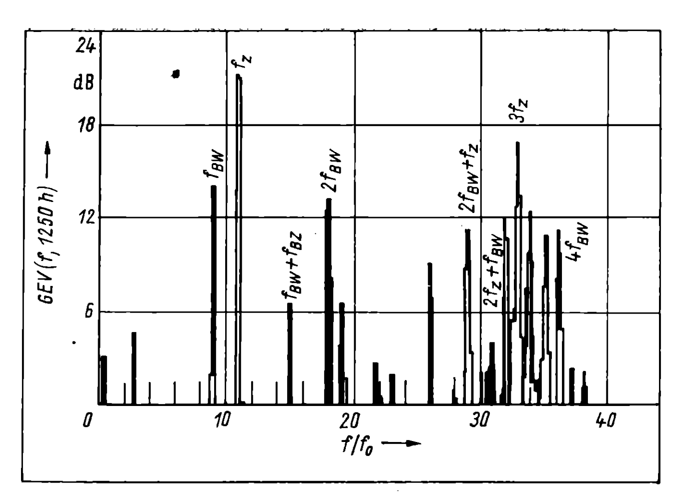


Bild 1. Ergebnis *GEV* des Vergleiches der *SLD* nach 1250 h Betriebsdauer (100 h vor der Havarie) mit der Grenzhüllkurve *GE* (auf der Basis der *SLD* nach 40 h Betriebsdauer)

gemäß

$$GEV(f, 1250\,\mathrm{h}) = \begin{cases} 1 & \text{für } SLD\ (f, 1250\,\mathrm{h}) < GE\ (f, 40\,\mathrm{h}) \\ \dfrac{SLD\ (f, 1250\,\mathrm{h})}{GE\ (f, 40\,\mathrm{h})} & \text{für } SLD > GE \end{cases}$$

Analysiertes Signal: Schwingungsbeschleunigung des Pumpengehäuses
Analyseparameter: $B \approx 3.1$ Hz; $f_0 = 25$ Hz; $f_z = 11 \cdot f_0$

sie meistens für die VAD benutzt werden, verwenden nur den Frequenzbereich).

- Kybernetische Methoden auf der Grundlage der Bilderkennung [4]: Muster ist hierbei die sog. Entscheidungsfunktion, mit deren Hilfe jedes Bild (hier Spektrum) einer entsprechenden Klasse der Diagnosezustände zugeordnet wird.

1. Traditionelles Vorgehen — klassische Methode

Zur Diagnose des Verschleißzustandes einer hydraulischen Zahnradpumpe vom Typ PC 3120 wurde eine in [3] angegebene Prozedur verwendet, bei der die obere Grenzhüllkurve *GH* gemäß (1) aus der spektralen Leistungsdichte *SLD* gebildet wird:

$$GH(a_i) \approx 6{,}31 \cdot \max\left(SLD(a_{i-1}), SLD(a_i), SLD(a_{i+1})\right), \tag{1}$$

wobei $SLD(a_i)$ die i-te Stichprobe der geschätzten *SLD* für den gewählten Verschleißzustand (im Bild 1 für eine Betriebsdauer $t_e = 40$ h) und $i = 0,1, \dots N-1$ (N Stichprobenanzahl der geschätzten *SLD*) sind.

Ein Beispielergebnis des Vergleiches einer *SLD*-Schätzung für eine Betriebsdauer $t_e = 1250$ h (das ist 100 h vor der Havarie) mit der Mustergrenzhüllkurve ist im Bild 1 dargestellt. Diese Hüllkurve wird für die Frequenzen f_Z und $3 \cdot f_Z$ (herrührend vom Verschleißzustand der Zahnräder) sowie für f_{BW} und $2 \cdot f_{BW}$ (herrührend vom Verschleißzustand der Wälzlager) überschritten. Diese Tatsache wird als Veränderung des Verschleißzustandes und der Arbeitsbedingungen dieser Bauelemente interpretiert.

2. Traditionelles Vorgehen — Bewertung der Änderungsgeschwindigkeit aufeinanderfolgender Schätzungen spektraler Kenngrößen [5]

Bei dieser Methode wird das Muster einer bestimmten Klasse von Verschleißzuständen auf der Basis der Änderungsgeschwindigkeit einer Schätzung für die Emission von Schwingungen und Geräuschen (z. B. der *SLD* der Schwingungsbeschleunigung des Pumpengehäuses) während der Einlaufphase ($t < t_d$) gebildet. Die Grenzhüllkurve V_w wird in folgender Weise bestimmt:

$$V'_w(i) = \frac{|SLD(i, te_2) - SLD(i, te_1)|}{te_2 - te_1}, \tag{2}$$

te_1, te_2 Betriebszeiten während der Einlaufphase ($te_1, te_2 \leqq t_d$)

$$V_w(i) = K \cdot \max\left(V'_w(i-1), V'_w(i), V'_w(i+1)\right) \tag{3}$$

$K = 2 \cdot \varepsilon_c$; ε_c Gesamtschätzfehler für die *SLD*, enthält Fehler der Meßkette und des zur Zwischenspeicherung des Meßsignals verwendeten Magnetbandes sowie den eigentlichen Schätzfehler bei der Ermittlung der SLD.

Analog wird nach der Einlaufphase

$$V'_k(i) = \frac{SLD(i, te_k) - SLD(i, te_n)}{te_k - te_n} \tag{4}$$

$te_k, te_n > t_d$

bestimmt und der Vergleich von V'_k und V_w folgendermaßen bewertet:

$$V_k(i) = \frac{V'_k(i)}{V_w(i)} = \begin{cases} 0 & \text{für } |V'_k(i)| < V_w(i) \\ \operatorname{sgn}(V'_k(i)) \cdot \dfrac{|V'_k(i)|}{V_w(i)} & \text{für } |V'_k(i)| \geqq V_w(i)\,. \end{cases} \tag{5}$$

$i = 0, 1, \dots, N-1$
$k = 1, 2, \dots, L-2$
L Anzahl der SLD-Schätzungen für $te > t_d$

Die Diagnose beruht hier auf einer Interpretation des Quotienten V_k/V_w, wobei V_k fortlaufend für diskrete Zeitabstände $\Delta te = te_k - te_n$ geschätzt wird. Dabei wird es möglich, den Verschleiß einzelner Bauelemente der zu prüfenden Anlage zu beobachten.

Ist nur eine grobe Klassifizierung (z. B. in „gut" — „Havarie bevorstehend" — „Havarie") erforderlich, genügt eine Schätzung des Effektivwertes *RMS* anstelle der *SLD*. Bild 2 zeigt dafür Beispielergebnisse. Wie auch im Bild erkennbar, gliedert sich die Betriebsdauer mechanischer Anlagen in aufeinander folgende Phasen

- der Schadensentstehung und dessen Anwachsen
- der teilweisen „Ausheilung" durch Anpassung der übrigen Bauelemente an die Zustandsänderung des geschädigten Bauelementes.

Dieser Vorgang dauert bis zur vollständigen Beschädigung der Anlage, d. h. bis in einem Bauelement solche Veränderungen vor sich gegangen sind, die zum nicht umkehrbaren Verlust der geforderten Nutzparameter des Objekts führen.

3. Kybernetisches Vorgehen — Bilderkennung mit Hilfe von Potentialfunktionen

Bei dieser Methode werden die geschätzten spektralen Kenngrößen, die den unterschiedlichen Verschleißzustands-Klassen entsprechen, wie Bilder betrachtet. Das gesammelte Material experimenteller Untersuchungen wird zur Belehrung eines Erkennungssystems verwendet, das die den verschiedenen Klassen zugehörigen Bilder automatisch klassifizieren soll.

Bei Potentialfunktionen in Form eines Skalarproduktes [2] und [4] werden die Größen X_L, die zur sog. Belehrung mit Lehrerhilfe (der Lehrer wird hier als Quelle von A-priori-Informationen über die Klassenzugehörigkeit der Bilder verstanden, die in der Lernphase Verwendung finden) verwendet werden, und die Größen X, die klassifiziert werden sollen, wie Vektoren betrachtet. Falls nur eine Einteilung in zwei Klassen (z. B. G: gut und S: schlecht) vorgenommen werden soll, ist die Entscheidungsfunktion F_n folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} F_n([x_i]) &= \sum_{j=1}^{k} \left(\frac{1}{\sqrt{j}} \cdot [x_{ij}] \cdot [x_i]\right) - \sum_{d=1}^{m} \left(\frac{1}{\sqrt{d}} [x_{id}] \cdot [x_i]\right) = \\ &= [x_i] \cdot \left(\sum_{j=1}^{k} \frac{1}{\sqrt{j}} \cdot [x_{ij}]\right) - \sum_{d=1}^{m} \left(\frac{1}{\sqrt{d}} \cdot [x_{id}]\right) \\ &= [x_i] \cdot [RV_n]\,. \end{aligned} \tag{6}$$

i Laufindex für die Elemente in X
k, m Anzahl der zur Belehrung benutzten Größen
$[RV_n]$ Richtungsvektor der Trennfläche zwischen den Klassen G und S

Die automatische Klassifizierung beruht auf der Auswertung von $\operatorname{sgn}(F_n)$:

$$\operatorname{sgn}(F_n) = \begin{cases} +1 & \text{Bild gehört zur Klasse } G \\ 0 & \text{keine Entscheidung} \\ -1 & \text{Bild gehört zur Klasse } S \end{cases} \tag{7}$$

Steht in der Lernphase das Ergebnis der Klassifizierung im Widerspruch zur Lehrerdeklaration, so wird F_n und folglich $[RV_n]$ modifiziert. Falls für X die *SLD* verwendet wird, enthält $[RV_n]$ Informationen über die Frequenzbereiche, in denen sich eine

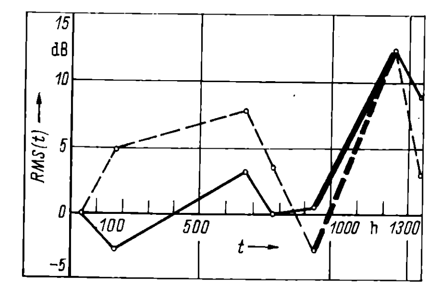


Bild 2. Effektivwert *RMS* der Schwingungsbeschleunigung des Pumpengehäuses in Abhängigkeit von der Betriebsdauer für die Frequenzbereiche
——— FR = ⟨0 ... 10 kHz⟩, — — — FR = = ⟨0 ... 1100 Hz⟩

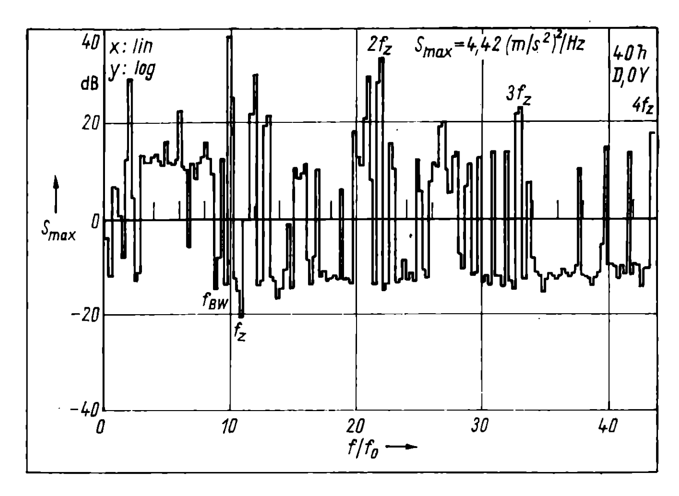


Bild 3. Vektorprodukt $[SLD_i^P$ (40 h)] gemäß (8)

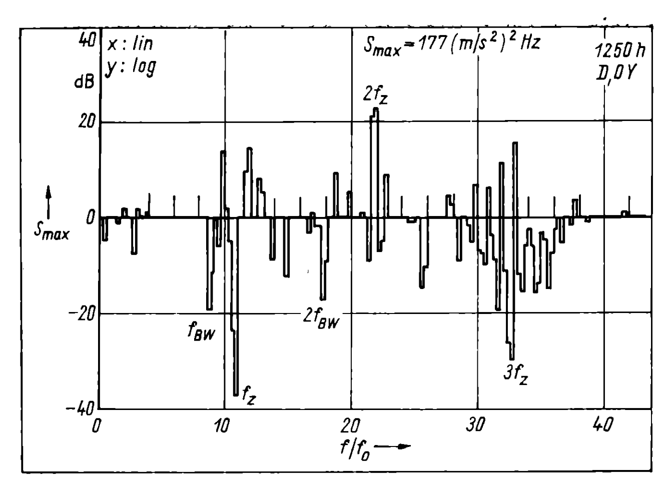


Bild 4. Vektorprodukt $[SLD_i^P$ (1250 h)] gemäß (8)

wesentliche Verschleißzustandsänderung des Objekts (z. B. von G zu S) widerspiegelt. In [5] wurde deshalb vorgeschlagen, diese Information in Form des Vektorproduktes $[\boldsymbol{SLD}] \times [\mathrm{sgn}(\boldsymbol{RV}_n)]$ (evtl. mit einer zusätzlichen Glättung) zu nutzen:

$$[\boldsymbol{SLD}_i^P] = [\sum_{j=i-1}^{i+1} (\boldsymbol{SLD}_j \cdot \mathrm{sgn}(\boldsymbol{RV}_{nj})] \,. \qquad (8)$$

$i = 1, 4, 7, \ldots, N-2$

Die Bilder 3 und 4 zeigen Beispielergebnisse für diese Vorgehensweise, wobei für die Ordinaten in diesen Darstellungen ein „erweiterter" logarithmischer Maßstab gemäß der Beziehung

$$\log(x) = \mathrm{sgn}(x) \cdot \log|x|;\ |x| \geqq 1 \qquad (9)$$

gewählt wurde. Die negativen Vektorkomponenten von $[\boldsymbol{SLD}_i^P]$ charakterisieren den Zustand S (kurz vor der Havarie bzw. bei Havarie) und die positiven Komponenten den Zustand G.

4. Bewertung der Methoden

Die hier vorgestellten Methoden sind hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit und der Aussagefähigkeit damit gewonnener Ergebnisse wie folgt einzuschätzen [5].

- Für die Phase der Forschungsarbeiten am Diagnoseobjekt (z. B. Analyse des kinematischen und dynamischen Verhaltens, Durchführung diagnostischer Tests) mit dem Ziel der Ausarbeitung einer Diagnosevorschrift ist der notwendige Aufwand
  - beim traditionellen Vorgehen sehr groß, da das zu erarbeitende Diagnosemodell für zuverlässige und ausführliche Diagnosen zumeist sehr kompliziert ist
  - beim kybernetischen Vorgehen sehr gering, da hierfür gar kein Modell erforderlich ist [4]
- Einschätzung der Aussagefähigkeit
  - Das Ziel der klassischen Methode (vgl. Abschn. 1.) ist die Faktordiagnose für Zwecke der Verschleiß- und Produktionsqualitätskontrolle. Im allgemeinen ist es nicht schwierig, anhand von Testmessungen nach einer gewissen Betriebsdauer die für eine Verschleißzustandsänderung des Objekts verantwortlichen Bauelemente (Faktoren) zu ermitteln (qualitativer Aspekt). Eine präzise quantitative Ermittlung des aktuellen Verschleißzustandes, d. h. die Bestimmung des erreichten Verschleißes und die Vorhersage der noch verbleibenden Zeit bis zur Havarie der gesamten Anlage oder einzelner Komponenten, ist für kompliziertere Diagnoseobjekte nur sehr schwer und selten zu erreichen. Gründe dafür sind vor allem die Schwierigkeiten
    - infolge der weitgehend willkürlichen Wahl der für das diagnostische Muster (hier Grenzhüllkurve) zugrunde gelegten Schätzgröße (hier spektrale Kenngrößen, zumeist SLD),
    - einer Vorhersage für die verbleibende Zeit bis zum Überschreiten der Grenzhüllkurve
    - einer Voraussage des Charakters der Spektrumsveränderung in Abhängigkeit vom Verschleiß. Der fortschreitende Verschleiß kann sowohl zu einer Pegelvergrößerung (in Richtung einer Überschreitung der Grenzhüllkurve) als auch zur Pegelverminderung (fast bis zum Verschwinden) gewisser Spektralanteile führen.

    Die Aussage der mit dieser Methode erzielten Ergebnisse führt deshalb oft nur auf eine Einordnung der gesamten zu diagnostizierenden Anlage in die Zustände „gut" und „schlecht". Die Möglichkeiten einer Faktordiagnose sind stark begrenzt
  - Das Ziel der Geschwindigkeitsmethode (vgl. Abschn. 2.) ist die Faktoranalyse. Die Methode ermöglicht eine genaue Bestimmung des Verschleißzustandes und eine Vorhersage von Havariezuständen. Die Anwendung dieser Methode wird dort empfohlen, wo eine erhöhte Diagnosegenauigkeit gefordert wird. Die Interpretation der Formveränderung von SLD-Änderungsgeschwindigkeitsvektoren für bestimmte charakteristische Frequenzen liefert gegenüber der klassischen Methode bessere Ergebnisse für die Faktordiagnose. Das ergibt sich aus der Objektivierung und der Selektivität des Diagnosekriteriums, in dessen Folge die Frequenzbereiche hervorgehoben werden, die mit einer wesentlichen Verschleißzustandsänderung in einer konkreten Anlage verbunden sind
  - Das Ziel der kybernetischen Methode (vgl. Abschn. 3.) sind Diagnosen für Zwecke der Verschleiß- und Produktionsqualitätskontrolle. Diese Methode ermöglicht anhand von Stichprobenmessungen eine zuverlässige Verschleißzustandsklassifizierung auf der Basis des in der Lernphase gebildeten „Wissens". Die Entscheidungsfunktion erlaubt eine präzise Vorhersage von Havariezuständen. Mit entsprechenden Ergänzungsprozeduren, wie in [5] vorgeschlagen und hier kurz vorgestellt, ist die Methode auch für eine Faktordiagnose geeignet
- Automatisierbarkeit der Experimente
  - Beim traditionellen Vorgehen stützt sich die Diagnose stark auf die Intuition und die Erfahrungen des Experimentators. Das Automatisierungsniveau ist deshalb relativ niedrig. Die Geschwindigkeitsmethode bietet günstigere Voraussetzungen zur Automatisierung der qualitativen Auswertung als die klassische Methode
  - Bei der kybernetischen Methode kann die Diagnose vollständig automatisiert werden.

Literatur

[1] *Barschdorff, D.; Hensle, W.; Stuehlen, B.:* Geräuschanalyse zur Schadenfrüherkennung an stationären Turbomaschinen als Problem der Mustererkennung. Archiv für technisches Messen 47 (1977) 5, S. 181–189.

[2] *Krzyworzeka, P.:* Uwagi o charakterystykach odwzorowania istotnych własności obiektu diagnostyki (Bemerkungen über Kenndaten zur Abbildung der wesentlichen Eigenschaften eines Diagnoseobjekts). In: Metody cyfrowej analizy sygnałów wibroakustycznych (Methoden der digitalen Analyse von vibroakustischen Signalen). Wrocław: Ossolineum 1979.

[3] *Randall, R. B.:* Efficient Machine Monitoring using an FFT-Analyzer and Desk-top Calculator. Brüel and Kjaer App. Note 18-212.

[4] *Konopka, J.:* O pewnej metodzie oceny stanu diagnostycznego układów mechanicznych (Über eine Methode zur Bewertung des diagnostischen Zustandes von mechanischen Anlagen). Dissertation, IPPT PAN Warschau 1980.

[5] *Szyszko, St.:* Analiza przydatności metod wibroakustycznych w diagnostyce maszyn i urządzeń mechanicznych (Analyse der Anwendbarkeit vibroakustischer Methoden in der Diagnose von Maschinen und mechanischen Anlagen). Dissertation, IAP PW Warschau 1982.

msr 7993

St. Kornacki[1])

Rechnersystem zur Verarbeitung von Meßsignalen[2])

0. Einleitung

Die Automatisierung von Tätigkeiten der experimentellen Forschung ist schon seit vielen Jahren eine der wesentlichsten Entwicklungsrichtungen der Laborpraxis. Immer öfter ist diese mit der Anwendung verschiedener Formen der Rechentechnik verbunden.

Auf dem Gebiet der wissenschaftlichen Forschung war es schon immer ein Haupterfordernis, die Forschungswerkzeuge zu vervollkommnen. Im Ergebnis der steigenden Anforderungen an Produktionsqualität und -effektivität kommt in den letzten Jahren diese Notwendigkeit auch in den Industrielabors, die qualitativ neue Aufgaben lösen müssen, immer mehr zum Tragen. In vielen Fällen zwingt der angestrebte Produktivitätsgewinn dazu, komplizierte Forschungsmethoden und -techniken direkt im Produktionsprozeß einzusetzen.

In bezug auf die spezifischen Bedingungen und die praktischen Konsequenzen ist die Einführung neuer Forschungsmittel einschließlich automatisierter, auf Rechnern basierender Systeme in der Industrie eine verantwortungsvolle und komplexe Aufgabe. Dabei müssen im besonderen die Anforderungen an eine hohe Zuverlässigkeit und einen entsprechenden ökonomischen Nutzen erfüllt werden.

Im Beitrag wird ein Rechnersystem vorgestellt, das vom Institut für industrielle Automatisierung der TH Warschau für das Forschungszentrum der Baumaschinenindustrie im Rahmen eines langfristigen Programms der Vervollkommnung der Forschungsausrüstung, u. a. durch den Einsatz der Rechentechnik, erarbeitet wurde. Dieses Programm sieht eine Automatisierung der Verarbeitung von Meßsignalen im Off-line-Betrieb (im folgenden als Automatisierung der Signalverarbeitung bezeichnet) und eine unmittelbare Steuerung von Prüfständen mit gleichzeitiger Datenerfassung und -verarbeitung im On-line-Betrieb (im folgenden als Steuerung des Experimentes bezeichnet) vor. Unter Berücksichtigung der praktischen Möglichkeiten wird die Automatisierungsaufgabe schrittweise verwirklicht. Die erste schon beendete Etappe betraf die Signalverarbeitung. In diesem Bereich ist das im folgenden beschriebene System angesiedelt. Zur Zeit wird es weiter ausgebaut und zur Steuerung von Experimenten vorbereitet.

1. System MERA-60/CAMAC

Das System enthält einen Kleinrechner MERA-60 mit Standard-Peripherie, CAMAC-Module und Geräte für die Signalverarbeitung bzw. -registrierung, wie Analogumformer, Analysatoren, Anzeigegeräte u. a. Die Konfiguration des Systems ist im Bild dargestellt. Das System hat eine variable Struktur, d. h., dank der Eigenschaften der CAMAC-Apparatur kann sein Meßkanal für verschiedene funktionelle und gerätetechnische Anlagen konfiguriert werden. Der Kleinrechner MERA-60 ist durch eine Datenfernübertragungslinie mit einem Rechner PDP-11/70 verbunden, der ansonsten vom Baumaschinenprojektanten genutzt wird. Diese Verbindung ermöglicht einen einfachen Datenaustausch, vor allem eine Übertragung der Daten für Projektierungsarbeiten.

Der Kleinrechner MERA-60 ist programmtechnisch mit dem PDP 11/03 der Firma Digital Equipment kompatibel und mit äquivalenten Systemprogrammen ausgestattet (Operationssystem RT-11). Die eigentliche Anlage zur Signalanalyse besteht aus dem Kleinrechner MERA-60 und einem CAMAC-Crate, der über den Steuermodul 109 an die ZVE angeschlossen ist. Dabei sind sämtliche Module auswechselbar. Die Entfernung zwischen dem Kleinrechner und dem CAMAC-Teil darf einige Meter nicht überschreiten, wobei die gesamte Anlage eine ortsfeste Konstruktionseinheit bildet. Als Forderung stand, das System der eingesetzten Meßtechnik anzupassen und Applikationsprogramme zu entwickeln. Die zu verarbeitenden Signale sind auf einem Magnetband gespeichert und werden zur Analyse abgerufen.

---

[1]) Dr.-Ing. *Stanislaw Kornacki* (38) studierte von 1962 bis 1968 Automatisierungstechnik an der Feinmechanischen Fakultät der TH Warschau. Seit 1968 Assistent und seit 1974 Adjunkt am Institut für Industrielle Automatisierungstechnik der TH Warschau. 1974 Promotion auf dem Gebiet der Modellierung elektro-hydraulischer Servoantriebe.

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrages erfolgte durch Dipl.-Ing. *W. Weiß*, TU Dresden.

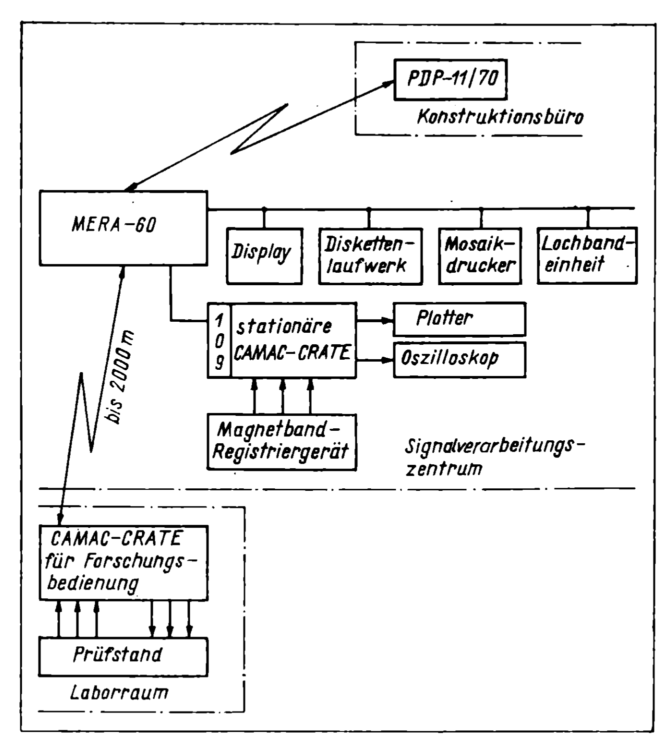


Bild. Konfiguration des Systems MERA-60/CAMAC

Die Thematik „Steuerung des Experimentes" befindet sich jetzt in einer Anarbeitungsphase. Dabei wird während der Einführungszeit mit Hilfe einer CAMAC-Station, die unter Kontrolle eines MERA-60 arbeitet und mit ihr durch eine Kabelübertragungslinie (bis zu 2 km) verbunden ist, gearbeitet. Die der Steuerung des Experiments zugeordnete CAMAC-Station ist in der Nähe des zu steuernden Objektes untergebracht. Sie ist mit E/A-Blöcken, einem minimalen Satz an peripheren Geräten (Tastatur und Display), einem autonomen Prozessor und Operativspeichern ausgerüstet. Die feste Programmausstattung einer solchen Station besteht aus einem Interpreter für die Operatorkommandos und einem Programm für die Bedienung der Datenübertragung; alle anderen Programme werden bei Bedarf vom MERA-60 nachgeladen.

Im Verlauf der Komplettierungsarbeiten am System MERA-60/CAMAC wurde angestrebt, Standardperipherie und vorhandene Programmierausstattung der Rechnerfamilie PDP-11 sowie autonomer CAMAC-Prozessoren maximal auszunutzen. Trotzdem war der Umfang der durchzuführenden Arbeiten sowohl auf gerätetechnischem als auch auf programmtechnischem Gebiet sehr groß. Daraus folgte, daß der Gegenstand der Arbeiten jeweils ein den Forschungsaufgaben angepaßtes Rechnersystem war.

Die Arbeiten am System MERA-60/CAMAC laufen seit dem Jahre 1980. Ihnen gingen jedoch Versuche der Signalverarbeitung bei der Prüfung von Baumaschinen voraus. Diese Testarbeiten wurden auf der Basis des Kleinrechnersystems KRS 4200 seit 1977 durchgeführt. Die auf diese Weise gewonnenen Erfahrungen und entwickelten Programme wurden bei der Arbeit am System MERA-60/CAMAC genutzt, woraus die vergleichsweise geringe Bearbeitungszeit resultiert.

2. Einsatzerfahrungen bei der Automatisierung der Signalverarbeitung

Auf dem Gebiet der Signalverarbeitung ist das System seit einem Jahr in Betrieb. Deshalb ist es möglich, sein Anwendungsgebiet abzugrenzen und Applikationseffekte auszuwerten. Im allgemeinen dominiert die Datenverarbeitung in den Forschungsaufgaben, in denen stochastische Signale analysiert werden sollten. Es geht dabei um die Prüfung dynamischen Verhaltens, der Dauerfestigkeit sowie ergonomischer Parameter von Maschinen unter normalen Einsatzbedingungen. Aussagefähige Resultate können hierbei nur erreicht werden, wenn Verläufe interessierender Variablen in entsprechend langen Zeiträumen registriert werden, was zu großen Mengen an zu verarbeitenden

Daten führt. Die Programmausstattung des Systems enthält Programme von Tests für die Bestimmung der Signalart und der günstigsten Verarbeitungsbedingungen bis hin zu Beschreibungen der Signalstruktur im Zeit-, Amplituden- und/oder Frequenzbereich. Auf der Basis von Grundanalysen sind die kompletten, spezialisierten Programmsätze für typische Forschungsaufgaben, wie Dauerfestigkeitsprognose für Maschinenelemente anhand experimentell bestimmter Spektren für deren dynamische Belastung, Tests der Übereinstimmung vibroakustischer Emission von Maschinen und ihrer Elemente mit Norman u. a., aufgebaut.
Nach der einjährigen Nutzung ist das Anwendungsfeld breit geworden und überschreitet die Grenzen des Labors, für das das System entworfen wurde. Neben dem realen Nutzen ist die Tatsache von großer Bedeutung, daß das System aus Anwendersicht projektiert wurde, d. h. einfach und ohne tiefere Kenntnisse auf dem Gebiet der Rechentechnik zu benutzen ist. Allgemein besteht jedoch der Hauptnutzen nicht in einer Verkürzung der Forschungszeit, obwohl diese Zeitverringerung zweifellos groß ist, sondern in der Möglichkeit, die qualitativ neuen Prüfungen mit einer deutlich vertieften Analyse und Resultatinterpretation ausführen zu können. Dieser Aspekt wurde sowohl vom Bedienpersonal als auch vom Anwender der Resultate, d. h. den Maschinenprojektanten, betont und war maßgebend für die Entscheidung, die Entwicklungsarbeiten am System fortzusetzen.

3. Zur Steuerung des Experiments

Auf dem Gebiet der Steuerung des Experiments kann man nur über geplante Einsatzfälle sprechen. Um den Charakter dieser Arbeiten zu illustrieren, wird eine im folgenden dargestellt. Dabei handelt es sich um die Prüfung von Triebwerken. Diese Prüfungen werden auf spezialisierten Prüfständen ausgeführt, wobei einzelne Bauelemente, -gruppen oder komplette Anlagen getestet werden. Auf jeden Fall muß das Forschungsobjekt als System mit mehreren Ein- und Ausgängen betrachtet werden. Dabei besteht das Forschungsziel in der Gewinnung von Charakteristiken zur Beschreibung des dynamischen und statischen Verhaltens. Die wesentlichsten Schwierigkeiten sind die Mehrvariabilität und die zahlreichen der Steuerung auferlegten Begrenzungen. Deshalb wird in der Praxis ein vereinfachtes Verfahren angewendet. Es besteht darin, die Untersuchung nur für bestimmte Punkte oder Flächen im Zustandsraum durchzuführen. Trotzdem ist der Zeitaufwand beträchtlich. Grundziele der rechnergestützten Steuerung sind hier die Reduzierung der Versuchszeit und die Erhöhung der Vollständigkeit und Genauigkeit der Untersuchungen durch optimale Planung und Steuerung der Messungen und durch Rechnererfassung und -verarbeitung der Daten. Solche Aufgaben sind methodisch kompliziert, und außerdem erfordert die effektive Einführung automatischer Steuerungen in der Regel umfangreiche Arbeiten zur Anpassung vorhandener Prüfstände und ihrer Meß- und Steuerausrüstung. Oft ist es rentabler, den Prüfstand vollkommen neu auszurichten. Dies ist vor allem der Grund dafür, daß die Steuerung der Experimente erst als zweite Etappe verwirklicht wird, nachdem Erfahrungen mit der Signalverarbeitung auf dem Rechner vorliegen.

Schlußbemerkungen

Im Beitrag wurde nur eine allgemeine Beschreibung der technischen Realisierung des Systems vorgestellt, weil diese maßgeblich von der vorhandenen Gerätetechnik bestimmt wird. Als Grundrichtung wird vorgeschlagen, Standardgerätetechnik mit langfristigen Entwicklungsperspektiven einzusetzen. Das hat auch über den Einsatz des Kleinrechners MERA-60, der der gegenwärtig in die Produktion eingeführten Rechnerfamilie CM angehört, entschieden. Investitionen wurden überall dort gering gehalten, wo die Verwirklichung einer für langfristigen Einsatz vorausgesehenen Zielkonfiguration unmöglich war. Den Charakter einer provisorischen Lösung haben die programmierten CAMAC-Terminals für die direkte Bedienung der Prüfstände. Bei minimaler Ergänzung der Gerätetechnik im Rahmen des stationären Systems zur Signalverarbeitung können praktische Aufgaben der Automatisierung der Forschung übernommen werden.
Beim gegenwärtigen Stand der in der VR Polen verfügbaren Mikrorechentechnik ist die Projektierung von Steueranlagen auf deren Basis nicht rentabel und als verfrüht anzusehen. Es wird angenommen, daß im Verlauf von 3 bis 4 Jahren die Elektroindustrie Bauelemente und -gruppen der Mikrorechnersysteme liefern wird, durch die komplette Anlagen mit erheblich geringerem Kosten- und Zeitaufwand konstruiert werden können. Diese Übergangszeit wird dazu genutzt, Steuerungsmethoden auszuarbeiten und zu überprüfen sowie die zur Automatisierung vorgesehenen Prüfstände gerätetechnisch anzupassen.
Zum Schluß sollte man betonen, daß die Einführung der Automatisierung der Forschung deutliche und schnelle Veränderungen der Forschung selbst mit sich bringt. Hier liegt der wesentliche Nutzen der gesamten Bemühungen, obwohl ein unmittelbarer ökonomischer Effekt schon aus der sich ergebenden Steigerung der Produktqualität abzuleiten ist. msr 7994

G. F. Filaretov[1])

Anwendung von Methoden der Versuchsplanung in der Laborautomatisierung[2])

0. Einleitung

Die Automatisierung des Experiments und die breite Anwendung von mathematischen Methoden zur Versuchsplanung (MPÉ, matematičeskije metody planirovanija èksperimenta) sind zwei bedeutsame Mittel zur Erhöhung der Effektivität der experimentellen Forschung. Dabei wird oft angenommen, daß die MPÉ eine gewisse theoretische Basis für die Versuchsdurchführung mit Hilfe von automatisierten Systemen zur experimentellen Forschung (ASÉI, avtomatizirovannye systemy èksperimental'nych issledovanij) sind, bei der sie breite Anwendung finden müßten. Aber die Analysen vieler realer ASÉI zeigen, daß die Versuchsplanung darin kaum angewendet wird.
Zur Erleichterung der Anwendung der MPÉ werden bestimmte Anstrengungen unternommen, die vor allem auf die Schaffung spezieller Pakete von Anwenderprogrammen gerichtet sind (gewöhnlich in Dialog-Arbeitsweise). Sie erleichtern die Auswahl dieses oder jenes Versuchsplanes, damit der Nutzer die MPÉ anwenden kann, ohne daß er ein Spezialist auf dem Gebiet der Versuchsplanung zu sein braucht [1]. Für eine breite Einführung der MPÉ in die Laborautomatisierung ist das aber nicht ausreichend. Das hängt damit zusammen, daß die MPÉ als mathematische Theorie, unabhängig von den Besonderheiten der Versuchsplanung, ohne Berücksichtigung ihrer möglichen spezifischen Forderungen entwickelt wurden. Daraus folgt, daß es durchaus wichtig ist, anzugeben, ob es irgendwelche Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung in den ASÉI gibt, wenn „ja", ob die bekannten MPÉ ohne Veränderung anwendbar sind oder ob sie einer Überarbeitung unter Berücksichtigung dieser Besonderheiten bedürfen.
Im weiteren soll versucht werden, von dieser Position aus das Problem der Versuchsdurchführung in solchen ASÉI zu betrachten, die für ingenieurtechnische Untersuchungen bestimmt sind, bei denen als typische Aufgabe häufig die Ermittlung eines statischen Modells steht. Aber bei der Verwendung von ASÉI können, wenn die einzelnen Versuche sehr schnell durchgeführt werden, auch dynamische Eigenschaften des Objekts (oder der Versuchsanlage, wo sich das zu untersuchende Objekt befindet) wirksam werden. Bei der Bestimmung der statischen Kennlinien des Objekts wirken die aufgezeigten dynamischen Eigenschaften störend und verzögern die gesamte Versuchsdurchführung. Natürlich kann eine ähnliche Situation auch beim gewöhnlichen Experimentieren ohne ASÉI auftreten, aber gerade bei den automatisierten Systemen, wo das Tempo der Versuchsdurchführung außerordentlich hoch sein kann, spielt dieser genannte Umstand eine besondere Rolle. Außerdem fordert die Berücksichtigung der Dynamik des Objekts zur schnellen Bestimmung der statischen Kennwerte mit vorgegebener Genauigkeit komplizierte Steuergesetze, die gerade mit Hilfe der ASÉI relativ einfach realisiert werden können.

[1]) Doz. Dr.-Ing. *Gennadij F. Filaretov* (45) studierte von 1956 bis 1962 an der Fakultät für Automatik und Telemechanik des Moskauer Energetischen Instituts (MEI) Regelungstechnik. 1969 Promotion A. Seit dieser Zeit Mitarbeiter, jetzt Dozent am Lehrstuhl für Automatik des MEI und stellvertretender Leiter dieses Lehrstuhls.

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrages lag in den Händen von Dipl.-Ing. *I. Landmann*, TU Dresden.

1. Mathematische Aufgabenstellung

Es wird angenommen, daß der Zusammenhang zwischen dem gemessenen Ausgang $(y(\vec{u}, t)$ des Objekts und den Steuervariablen $u_i(t)$; $i = 1, 2, \ldots, n$ für jeden beliebigen Zeitpunkt t folgendermaßen dargestellt werden kann:

$$\left.\begin{aligned} M\{y(\vec{u}, t)\} &= \psi[\vec{u}(t); \vec{u}^{(1)}(t); \vec{u}^{(2)}(t); \ldots, \vec{u}^{(K)}(t); \\ &\quad y^{(1)}(t); \ldots; y^{(m)}(t)], \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

wobei $M\{y(\vec{u}), t\}$ der mathematische Erwartungswert der Größe $y(\vec{u}, t)$ ist, und es gilt:

$$\vec{u}(t) = ||u_1(t), u_2(t), \ldots, u_n(t)||;$$

$$\vec{u}^{(j)}(t) = \left\|\frac{d^j u_1(t)}{dt^j}, \frac{d^j u_2(t)}{dt^j}, \ldots, \frac{d^j u_n(t)}{dt^j}\right\|,$$

$$j = 1, 2, \ldots, K;$$

$$y^{(l)}(t) = \frac{d^l y(t)}{dt^l}, \quad l = 1, 2, \ldots, m.$$

Die gewöhnlich unkorrelierten Meßfehler am Ausgang haben den mathematischen Erwartungswert Null und eine konstante Dispersion. Gesucht wird die statische Abhängigkeit

$$\left.\begin{aligned} M\{y(\vec{u})\} &= \varphi(\vec{u}) = \psi[\vec{u}(t) \,|\vec{u}^{(1)}(t) = 0; \vec{u}^{(2)}(t) = 0; \ldots; \\ &\quad \vec{u}^{(K)}(t) = 0; y^{(1)}(t) = 0; \ldots; y^{(m)}(t) = 0] = \\ &\quad \varphi(\vec{u}, \vec{\Theta}) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Dabei bezeichnet $\vec{\Theta}$ den Vektor der unbekannten Parameter, von denen die Funktion φ abhängt.:

$$\vec{\Theta}^T = ||\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2, \ldots, \Theta_d||.$$

Für die weiteren Betrachtungen empfiehlt es sich, die Abhängigkeit (1) in einer konkreteren Form darzustellen, z. B. als Reihenschaltung von dynamischen Kanälen und eines statischen (im allgemeinen nichtlinearen) Funktionswandlers (Bild 1):

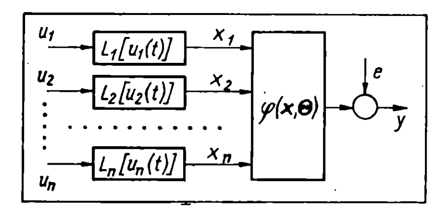


Bild 1. Struktur des zu untersuchenden Objekts

$$\left.\begin{aligned} &M\{y(\vec{u}, t)\} = \varphi(\vec{x}(t), \vec{\Theta}); \\ &\vec{x}^T(t) = ||x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)||; \\ &x_i(t) = L_i[u_i(t)], \quad i = 1, 2, \ldots, n. \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Dabei ist $L_i[u_i(t)]$ ein linearer dynamischer Operator, der z. B. durch die Übertragungsfunktion $W_i(p)$ charakterisiert ist. Weiterhin soll gelten:

$$\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \sum_{j=u}^{d} f_j(\vec{x})\, \Theta_j = \vec{f}^T(\vec{x}) \cdot \vec{\Theta}. \tag{4}$$

Hier ist $\vec{f}^T(\vec{x}) = ||f_0(\vec{x}), f_1(\vec{x}), \ldots, f_d(\vec{x})||$ der Vektor der bekannten Funktionen der Variablen $x_1, x_2, \ldots, x_n$.
Die Messungen sollen zu den Zeitpunkten $T_l = l \cdot \Delta T$; $l = 1, 2, \ldots$, vorgenommen werden. Dann darf man im Unterschied zur klassischen Versuchsplanung schon nicht mehr annehmen, daß jeder l-te Versuch in einem beliebigen Punkt des Versuchsplanes erfolgen kann. Die Existenz der Dynamik in den Steuerkanälen, aber auch die natürlichen Begrenzungen für die zulässigen Werte der Steuersignale $u_i : u_{i\,min} \leqq u_i \leqq u_{i\,max}$; $i = 1, 2, \ldots, n$ führen dazu, daß die Abstände zwischen den Punkten im Faktorraum für fortlaufende l i. allg. bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten können. Das heißt, daß das zulässige Gebiet der Anordnung des aktuellen Versuchspunktes nur ein kleiner Teil des gesamten Versuchsplanes Ω_x sein kann. Es ist nicht schwer zu verstehen, daß für eine Struktur wie im Bild 1 dieses zulässige Gebiet ein n-dimensionales Hyperparallelepiped darstellt, dessen Ausmaße von den Operatoren L_i und den Signalen u_i abhängen und die Anordnung von der Lage des vorhergehenden Versuchspunktes.
Es können zwei verschiedene Fälle auftreten:

- Die dynamischen Eigenschaften des Objekts $(W_i(p))$ sind bekannt
- Die genannten Eigenschaften sind nicht bekannt.

Im folgenden wird nur der einfachere erste Fall betrachtet. Für viele Situationen in der Praxis ist er durchaus real. Es sollen vor allem solche Systeme in Betracht gezogen werden, bei denen das zu untersuchende Objekt in eine Versuchsanlage eingeordnet ist, mit deren Hilfe die Experimente durchgeführt werden. Selbst wenn das Objekt keine dynamischen Eigenschaften hat, können die Einrichtungen der Versuchsanlage solche aufweisen. Ein klassisches Beispiel:

Versuchsanlage — Thermostat;
x — Temperatur im Thermostat, die die Größe y des zu untersuchenden Objekts beeinflußt;
u — Strom, der durch das Heizelement des Thermostats fließt.

Es ist ersichtlich, daß die dynamische Kennlinie des Kanals $x = L[u]$ als bekannt angenommen werden kann; außerdem kann der Wert x leicht mit Hilfe des Stromes u gemessen werden.

2. Aufgabe der Versuchsplanung bei Vorhandensein dynamischer Eigenschaften und Lösungsweg

Für die Versuchsplanung mit dem Ziel der Erstellung eines statischen Regressionsmodells bei Vorhandensein einer störend wirkenden Dynamik sind mehrere Varianten für die Aufgabenstellung möglich.

a) Der Versuchsplan für die Variablen $\vec{x}$ ist gegeben; gefordert wird seine Realisierung so, daß die Gesamtversuchszeit minimal ist. Für die Lösung ist es notwendig,
   - die Zeit des Übergangs von einem Punkt des Planes zu einen anderen zu minimieren; dieses Problem wird mit Hilfe bekannter zeitoptimaler Methoden der Theorie der automatischen Steuerung gelöst
   - die optimale Trajektorie der Übergänge von einem Punkt des Versuchsplanes zum anderen auszuwählen; ein direktes Mittel zum Auffinden einer solchen Trajektorie ist die Methode des Variantenvergleichs.

   Beispiel 1. Das zu untersuchende Objekt ist einkanalig $(n = 1)$; der lineare dynamische Operator ist ein Verzögerungsglied $\left(W(p) = \frac{1}{1 + pT}\right)$. Der Versuchsplan sieht jeweils einen Versuch in den Punkten $x_1, x_2, \ldots, x_n$ $(x_1 < x_2 < \ldots < x_n)$ vor. Eine mögliche Steuerung ist $u = 0, U_{max}$, wobei $U_{max} = x_n + \lambda$, $\lambda > 0$ ist, für den Anfangszustand gilt $u = 0$, $x = 0$.
   Im gegebenen Fall kann man leicht herausfinden, daß diejenige Trajektorie optimal ist, bei der die Werte x nacheinander von x_1 bis x_n durchlaufen werden; die optimale Steuerung lautet $u(t) = U_{max}$, $t > 0$. Die Gesamtzeit für die Realisierung aller N Versuche beträgt dabei (wenn die Zeit für das einmalige Messen der Werte y vernachlässigt wird):

   $$T_{Exp.} = T \cdot l_n \frac{x_n + \lambda}{\lambda}.$$

   Bei standardmäßiger Versuchsdurchführung, wenn der Experimentator den dynamischen Einfluß einfach ausschaltet, indem er die Beendigung der Übergangsprozesse abwartet, gilt:

   $$T^*_{Exp.} = 3T \cdot N.$$

   Es werden folgende Werte angenommen:

   $$N = 15, x_1 = 1, x_2 = 2, \ldots, x_{15} = 15, \lambda = 1.$$

   Dann gilt $T_{Exp} = T \cdot l_n \cdot 16 = 2{,}77\ T$, $T^*_{Exp} = 45\ T$, d. h., die Versuchszeit verkürzt sich ungefähr um das N-fache.

   Beispiel 2. Das zu untersuchende Objekt hat n Kanäle, die linearen dynamischen Operationen sind Verzögerungsglieder mit den Übertragungsfunktionen $W_i(p) = \frac{1}{1 + pT_i}$ (es wird außerdem angenommen, daß $T_1 < T_2 < \ldots < T_n$ gilt). Der Versuchsplan ist ein vollständiger (2^n) oder ein unvollständiger (2^{n-r}) faktorieller Plan. Der Anfangszustand fällt mit einem der Versuchspunkte zusammen.
   Man kann sich überzeugen, daß diejenige Trajektorie optimal ist, für die die Anzahl der Übergänge γ_i der Werte des Faktors x_i vom niederen zum höheren Niveau und umgekehrt folgender Bedingung genügt: $\gamma_1 > \gamma_2 > \ldots > \gamma_n$, d. h., die Zahl der Übergänge muß für den am meisten verzögerten Kanal minimal sein $(\gamma_n = 1, \gamma_{n-1} = 2, \gamma_{n-2} = 4, \ldots)$.

b) Gegeben sind die Anzahl N der Versuche und der Anfangszustand (der Anfangspunkt im faktoriellen Plan); die Versuche werden in einem festgelegten Zeitintervall ΔT durch-

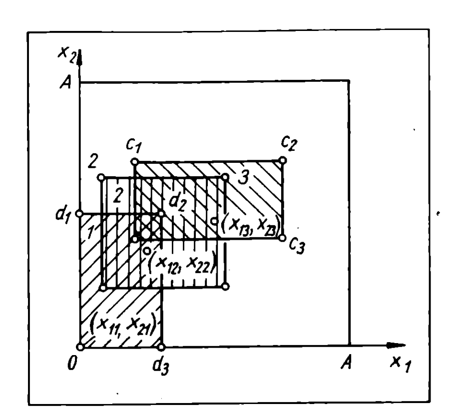


Bild 2. Anordnung der zulässigen Werte der Faktoren x_1, x_2 im Versuchsplan

geführt. Gesucht ist ein Versuchsplan, der die besten Eigenschaften des Regressionsmodells im Sinne des einen oder anderen Kriteriums der optimalen Versuchsplanung gewährleistet.

Hier empfiehlt sich die Unterteilung in zwei Varianten. Die erste Variante tritt dann auf, wenn N und die Zahl der zu schätzenden Modellparameter fast gleich groß sind, d. h., wenn der Plan gesättigt ist bzw. sich nur geringfügig vom gesättigten unterscheidet.

Beispiel 3. Das Objekt ist zweikanalig ($n = 2$); die dynamischen Operatoren sind Verzögerungsglieder mit $W_1 = \frac{1}{1 + pT_1}$ und $W_2 = \frac{1}{1 + pT_2}$. Gesucht wird das Regressionsmodell $\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \Theta_1 x_1 + \Theta_2 x_2$. Der Anfangszustand (der erste Punkt des Planes) liegt bei $x_{11} = 0$; $x_{21} = 0$. Für die Beschränkung der Steuerung gilt $0 \leqq u_i \leqq A = x_{i\,\max}$; $i = 1, 2$. Für die Versuchszahl $N = 4$ soll ein D-optimaler Plan aufgestellt werden. Entsprechend dem Kriterium der D-Optimalität ist es notwendig, eine solche Verteilung der Punkte zu finden, bei der folgende Determinante D maximiert wird:

$$D = \begin{vmatrix} \sum\limits_{i=1}^{4} x_{1i}^2 & \sum\limits_{i=1}^{4} x_{1i}x_{2i} \\ \sum\limits_{i=1}^{4} x_{1i}x_{2i} & \sum\limits_{i=1}^{4} x_{2i}^2 \end{vmatrix}$$

$$= (x_{12}^2 + x_{13}^2 + x_{14}^2)\,(x_{22}^2 + x_{23}^2 + x_{24}^2) - (x_{12}x_{22} + x_{13}x_{23} + x_{14}x_{24})^2 \,.$$

Dabei gelten, wie schon weiter oben bemerkt, im Unterschied zur klassischen Aufgabenstellung, für die Differenzen $a_{i1} = x_{i2} - x_{i1}$; $a_{i2} = x_{i3} - x_{i2}$; $a_{i3} = x_{i4} - x_{i3}$; $i = 1, 2$ die zusätzlichen Einschränkungen

$$\left.\begin{array}{ll} a_{ij\,\min} \leqq a_{ij} \leqq a_{ij\,\max}, & i = 1, 2, \dots, n; \\ j = 1, 2, \dots, N - 1, & \end{array}\right\} \qquad (5)$$

hervorgerufen durch die dynamischen Eigenschaften des Objekts.

Im allgemeinen kann sich die Koordinate x_i in der Zeit ΔT bei den vorgegebenen Steuerbeschränkungen nur in bestimmten Grenzen ändern. Der Ungleichung (5) entspricht für jedes j (hier $j = 1, 2, 3$) im Faktorraum ein rechteckiges Gebiet, in dem der aktuelle Versuchspunkt liegen kann.

Zur Lösung der Aufgabe wird die dynamische Programmierung verwendet. Unter der Annahme, daß auf irgendeine Weise der Punkt (x_{13}, x_{23}) ermittelt wurde, wird jetzt der optimale Wert (a_{13}, a_{23}) berechnet, der die Determinante D maximiert. Man kann sich davon überzeugen, daß für beliebige (x_{13}, x_{23}) der optimale Wert (x_{14}, x_{24}) der Anordnung des Versuchspunktes in einem der Eckpunkte C_1, C_2, C_3 des Rechtecks 3 (Bild 2) entspricht. Analog kann man bei fest vorgegebenem Punkt (x_{12}, x_{22}) zeigen, daß die optimale Anordnung des dritten Versuchspunktes in einem beliebigen Eckpunkt des Rechtecks 2 liegt, und schließlich befindet sich die optimale Anordnung des Punktes (x_{12}, x_{22}) in einem der Eckpunkte d_1, d_2, d_3 des Rechtecks 1. Jetzt müssen für alle möglichen Varianten (insgesamt 36) nur noch die entsprechenden Determinanten berechnet und für das Maximum der optimale Plan aufgestellt werden. Für die Werte $\Delta T = 1$, $T_2 = 2$ $T_1 = 4$, $A = 1$ hat der Plan folgende Koordinaten:

$$x_{11} = 0,\ x_{21} = 0; \qquad x_{12} = 0{,}393,\ x_{22} = 0;$$
$$x_{13} = 0{,}632,\ x_{23} = 0{,}221; \quad x_{14} = 0{,}383,\ x_{24} = 0{,}393$$

(s. Punkte I, II, III, IV im Bild 3).

Für die Steuerung ergibt sich:

$$u_{12} = 1,\ u_{22} = 0,\ u_{13} = 1,\ u_{23} = 1,\ u_{14} = 0,\ u_{24} = 1.$$

Wenn für die Anzahl der Versuche gilt: $N \gg d$, d. h. der Plan ist ungesättigt, dann kann man anders vorgehen, indem man gewöhnliche, bekannte Pläne benutzt und versucht, eine maximale Versuchszahl innerhalb des Punktespektrums des gegebenen Plans anzuordnen sowie die Verluste infolge der Übergangsprozesse zu minimieren.

c) Fortlaufende Versuchsplanung. In diesem Fall bleibt die Grundidee der Versuchsplanung erhalten, d. h., bei der Planung wird in jedem ($N + 1$)-ten Schritt ein Punkt gefunden, in dem ein neuer, zusätzlicher Versuch dem Nutzer den größten Informationszuwachs bringt. Unter Verwendung des Kriteriums der D-Optimalität werden die Koordinaten des besten Punktes $\vec{x}^{N+1}$ aus der Bedingung

$$\max_{\vec{x}^{N+1} \in \Omega_x^{N+1}} \vec{f}^T(\vec{x}^{N+1})\, \vec{C}_N \vec{f}(\vec{x}^{N+1})$$

gesucht [2].

Dabei gilt

$\vec{C}_N$ Dispersionsmatrix der geschätzten Regressionskoeffizienten nach N Versuchen;

Ω_x^{N+1} Planungsgebiet im ($N + 1$)ten Schritt.

Im Unterschied zur klassischen Aufgabenstellung fällt Ω_x^{N+1} nicht mit Ω_x zusammen, da für den zulässigen Zuwachs der Koordinaten Beschränkungen der Form (5) gelten.

Beispiel 4. Gesucht wird das Regressionsmodell

$$\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \Theta_0 + \sum_{i=1}^{d} \Theta_i x_i \,;$$

die Dynamik ist beliebig. Es ist nicht schwer, zu erkennen, daß das Maximum der quadratischen Form (6) in den Eckpunkten des Gebiets Θ_x^{N+1}, das durch die Ungleichungen (5) mit $j = N + 1$; $i = 1, 2, \dots, n$ definiert ist, erreicht wird. Bild 3 zeigt die Trajektorie der Anordnung der Versuchspunkte bei fortlaufender Planung für das Objekt aus Beispiel 3 und das Modell $\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \Theta_1 x_1 + \Theta_2 x_2$ (Bild 3a) bzw. das Modell $\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \Theta_0 + \Theta_1 x_1 + \Theta_2 x_2$ (Bild 3b). In beiden Fällen wurde als Ausgangsplan der D-optimale Versuchsplan aus Beispiel 3 gewählt.

(Fortsetzung auf Seite 87)

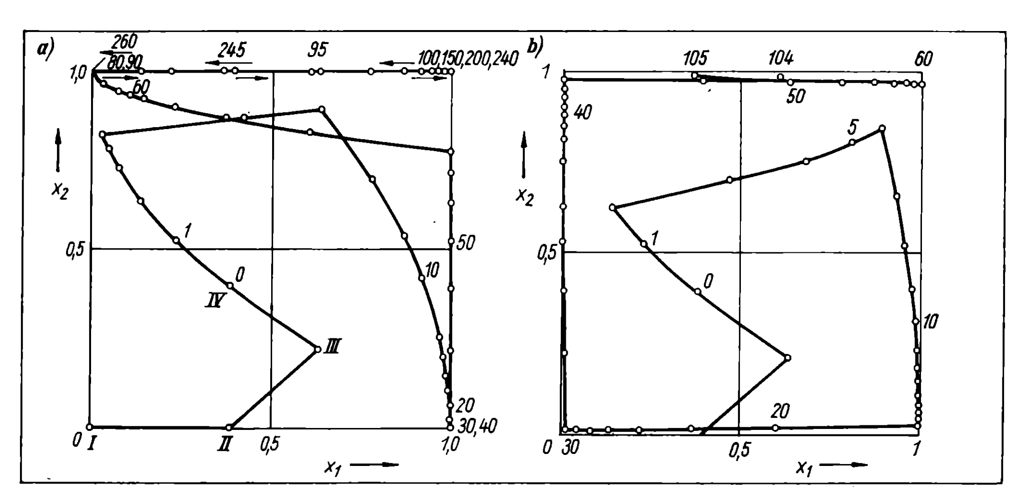


Bild 3. Anordnung der experimentell ermittelten Punkte bei der fortlaufenden Versuchsplanung für die Modelle

a) $\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \Theta_1 x_1 + \Theta_2 x_2$;

b) $\varphi(\vec{x}, \vec{\Theta}) = \Theta_0 + \Theta_1 x_1 + \Theta_2 x_2$

G. Bretthauer; H. Töpfer[1])

Ermittlung der notwendigen Meßsignale zur Modellgewinnung an Mehrgrößenregelkreisen [2])

0. Einleitung

Für die Lösung einer Vielzahl von Problemen in der Automatisierungstechnik, z. B.

- des Entwurfs zentraler, dezentraler und robuster Regler
- der Vorhersage wichtiger Signalverläufe zur frühzeitigen Erkennung von Betriebsstörungen u. ä.
- der Berechnung nicht direkt meßbarer Größen
- der Optimierung sowie Koordinierung eines vorgegebenen hierarchisch strukturierten Systems

ist es speziell bei Nutzung moderner Verfahren unumgänglich, ein mathematisches Modell für das untersuchte System zu erstellen, das die jeweils interessierenden Eigenschaften des Systems genügend genau widerspiegelt. Die Ermittlung eines solchen Modells erfolgt bei vielen technischen und nichttechnischen Systemen vorwiegend auf experimentellem Wege.

Mit zunehmendem Kompliziertheitsgrad (Dimension, Komplexität) der zu untersuchenden Systeme wird jedoch die Durchführung entsprechender Experimente zeitlich und inhaltlich immer aufwendiger und damit teurer, so daß besonders bei Beachtung der meist sehr strengen zeitlichen Limitierung für die Experimente an umfangreicheren und komplexen Systemen eine Minimierung des Aufwandes und die Teilautomatisierung der experimentellen Forschungsarbeiten zunehmend an Bedeutung gewinnen [1] und [2]. Das wird noch dadurch unterstrichen, daß die Zahl der zu untersuchenden Systeme aus den verschiedensten technischen und nichttechnischen Anwendungsgebieten ständig wächst. Die gerätemäßige Basis für eine solche Automatisierung der experimentellen Forschung bilden dabei die modernen Mikrorechnersysteme und entsprechende PEA-Komponenten [3] bis [5].

Auf dem Gebiet der experimentellen Prozeßanalyse stellt die Modellgewinnung an Mehrgrößenregelkreisen international gegenwärtig einen Forschungsschwerpunkt dar. Dies liegt darin begründet, daß eine Vielzahl von realen Systemen echte Mehrgrößensysteme sind, bei denen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, der Sicherheit oder der Funktionsfähigkeit die Modellbildung nur am geschlossenen Regelkreis durchgeführt werden kann. Aufgrund der Komplexität dieser Systemklasse kommt hier der gezielten Vorbereitung der Identifikationsexperimente große Bedeutung zu.

Da in einem solchen Mehrgrößenregelkreis i. allg. mehr als nur zwei Signalvektoren meßbar sind (s. Bild), entsteht das Problem, wieviel und welche Signalvektoren für die Modellgewinnung zu messen sind. Die Festlegung der „günstigsten" Signalvektorkombination stellt dabei den ersten Schritt bei der zielgerichteten Gestaltung der experimentellen Bedingungen dar.

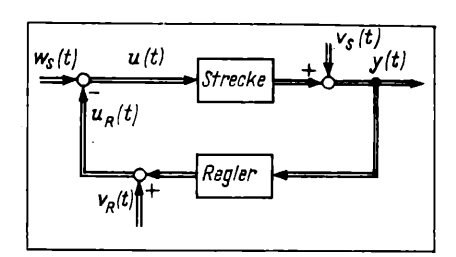


Bild. **Mehrgrößenregelkreis**

Im vorliegenden Beitrag wird nun eine Methodik zur Ermittlung der notwendigen bzw. geeigneten Meßsignale für die Modellgewinnung an Mehrgrößenregelkreisen beschrieben. Der dazu vorgeschlagene Lösungsweg wird anhand eines Beispieles dargestellt, und es werden die bei Messungen von zwei, drei sowie vier Signalvektoren erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt und diskutiert.

1. Voraussetzungen und Bezeichnungen

Vorausgesetzt wird ein stabiler Mehrgrößenregelkreis (Bild), der aus einer linearen, zeitinvarianten mehrvariablen Regelstrecke und einem ebenfalls linearen, zeitinvarianten Mehrgrößenregler besteht. Für die auftretenden Signale gelte:

$\boldsymbol{u}(t)$	m-dimensionaler Eingangsgrößenvektor
$\boldsymbol{y}(t)$	n-dimensionaler Ausgangsgrößenvektor
$\boldsymbol{v}_S(t)$	n-dimensionaler Störgrößenvektor
$\boldsymbol{v}_R(t)$	m-dimensionaler Störgrößenvektor
$\boldsymbol{w}_S(t)$	m-dimensionaler Testgrößenvektor
$\boldsymbol{u}_R(t)$	m-dimensionaler Ausgangsgrößenvektor des Reglers.

$\boldsymbol{u}(t)$, $\boldsymbol{y}(t)$ und $\boldsymbol{u}_R(t)$ stellen dabei Kreissignalvektoren dar, während $\boldsymbol{v}_S(t)$, $\boldsymbol{v}_R(t)$ und $\boldsymbol{w}_S(t)$ von außen auf den Mehrgrößenregelkreis einwirkende Stör- bzw. Testsignalvektoren sind. Für $\boldsymbol{v}_S(t)$, $\boldsymbol{v}_R(t)$ und $\boldsymbol{w}_S(t)$ wird vorausgesetzt, daß sie paarweise unkorreliert sind. Insgesamt treten hier sechs verschiedene Signalvektoren auf, von denen nur eine bestimmte Anzahl meßbar ist und bisher nur $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ (direkte Methode, Verbundprozeßmethode), $\boldsymbol{w}_S(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ (indirekte Methode) sowie $\boldsymbol{w}_S(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ (Korrelationsmethode) zur Auswertung verwendet werden. Jede Methode ist somit an eine ganz bestimmte Signalvektorkombination gebunden. Die anderen möglichen Signalvektorkombinationen wurden in der Literatur bisher nicht weiter betrachtet. Im Rahmen einer Optimierung der Versuchsbedingungen sind sie jedoch in die Untersuchungen einzubeziehen.

Die Ermittlung der für die Modellbildung an Mehrgrößenregelkreisen benötigten Meßsignale erfolgt dabei zweckmäßigerweise im Frequenzbereich. Da sich die erhaltenen Ergebnisse jedoch auf die Meßsignale beziehen, gelten sie sowohl für die Modellbildung im Frequenz- als auch im Zeitbereich und sind unabhängig von der speziellen Modellform.

Für die folgenden Betrachtungen wird nun die mehrvariable Regelstrecke im Frequenzbereich durch die Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_S(j\omega)$ und der entsprechende Regler durch die Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_R(j\omega)$ beschrieben.

Weiter wird vorausgesetzt, daß die Matrizen

$$(\boldsymbol{I}_n + \boldsymbol{G}_S(j\omega)\boldsymbol{G}_R(j\omega))^{-1} \quad \text{und} \quad (\boldsymbol{I}_m + \boldsymbol{G}_R(j\omega)\,\boldsymbol{G}_S(j\omega))^{-1}$$

mit $\boldsymbol{I}_n$ bzw. $\boldsymbol{I}_m$ als (n, n)- bzw. (m, m)-Einheitsmatrix existieren. Die Berechnung der zur Auswertung verwendeten Spektraldichtematrizen $\boldsymbol{S}_{..}(j\omega)$ (z. B. $\boldsymbol{S}_{uu}(j\omega)$ für $\boldsymbol{u}(t)$) erfolgt wie in [6] beschrieben. Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im weiteren das Argument $j\omega$ bei $\boldsymbol{G}(j\omega)$ und $\boldsymbol{S}_{..}(j\omega)$ weggelassen.

In dem betrachteten Mehrgrößenregelkreis sind die Frequenzgangmatrizen $\boldsymbol{G}_S$ und $\boldsymbol{G}_R$ sowie in Abhängigkeit von den jeweils gemessenen Signalvektoren ein, zwei oder alle drei von außen angreifenden Signalvektoren unbekannt. Die Ermittlung aller dieser unbekannten Größen (Frequenzgangmatrizen $\boldsymbol{G}_S$ und $\boldsymbol{G}_R$ sowie Spektraldichtematrizen $\boldsymbol{S}_{w_Sw_S}$, $\boldsymbol{S}_{v_Sv_S}$ und $\boldsymbol{S}_{v_Rv_R}$) soll hier mit vollständiger System- und Signalidentifikation bezeichnet werden, während die Ermittlung eines Teiles der unbekannten Matrizen (z. B. nur $\boldsymbol{G}_S$ und $\boldsymbol{S}_{v_Sv_S}$) mit teilweiser System- und Signalidentifikation bezeichnet wird. Die theoretische Grundlage hierfür liefert das Konzept der vollständigen und teilweisen Identifizierbarkeit eines Mehrgrößenregelkreises in Abhängigkeit von den experimentellen Bedingungen, das in [7] und [8] dargestellt ist.

2. Herleitung des Lösungsweges

Die Anzahl n_s aller im Mehrgrößenregelkreis (s. Bild) auftretenden Signalvektoren ist $n_s = 6$. Von diesen werden jedoch nur eine bestimmte Anzahl $n_m < n_s$ gemessen, z. B. $n_m = 2$ bei der indirekten Methode und der direkten Methode oder $n_m = 3$ bei der Korrelationsmethode. Die Anzahl n_a aller möglichen Signalvektorkombinationen für eine feste Anzahl n_m beträgt dabei

$$n_a = \binom{n_s}{n_m}. \tag{1}$$

In nachfolgender Tafel ist die Anzahl n_a für verschiedene n_m bei $n_s = 6$ zusammengestellt:

n_m	1	2	3	4	5	6
n_a	6	15	20	15	6	1

---

[1]) Dr.-Ing. *Georg Bretthauer* (36) erlernte den Beruf eines Maschinenbauers. Von 1966 bis 1970 studierte er an der TU Dresden Regelungstechnik. Seit 1970 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, Institutsteil Dresden. 1977 Promotion A.

(Prof. Dr. sc. techn. *Heinz Töpfer* s. Beitrag „Zum Stand der Anwendung moderner Automatisierungsmittel" auf S. 2 des Heftes 1/1984).

[2]) Der Beitrag ist Teil einer an der TU Dresden eingereichten Dissertation B.

Für praktische Untersuchungen sind aber nur die Fälle von $n_m = 2$, 3 und 4 von Interesse, da bei $n_m = 1$ auch nur eine unbekannte Matrix ermittelt werden kann und bei $n_m = 5$ bzw. $n_m = 6$ zwar alle unbekannten Matrizen bestimmt werden können, jedoch der meßtechnische Aufwand sehr groß ist. Deshalb werden im weiteren nur die Fälle $n_m = 2$; 3; 4 betrachtet. Für $n_m = 2$ und $n_m = 3$ und $n_m = 4$ sind insgesamt 15, 20 bzw. 15 verschiedene Signalvektorkombinationen möglich, von denen jedoch nur eine bestimmte Anzahl die vollständige Identifikation, d. h. die Ermittlung aller unbekannten Frequenzgang- und Spektraldichtematrizen, erlaubt. Um diese Signalvektorkombinationen zu ermitteln, werden zuerst für jede einzelne von ihnen aus den dazugehörenden Signalvektoren die entsprechenden Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen berechnet. Anschließend wird das daraus gebildete Matrizengleichungssystem auf seine Auflösbarkeit bezüglich der unbekannten Matrizen untersucht.

Der Lösungsweg hierfür wird nun anhand der Korrelationsmethode, d. h. für die Signalvektorkombination $(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{y}(t), \boldsymbol{w}_S(t))$ dargestellt. Aus $\boldsymbol{y}(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{w}_S(t)$ lassen sich die folgenden fünf voneinander verschiedenen Spektraldichtematrizen berechnen:

$$\boldsymbol{S}_{yy} = f_1(\boldsymbol{G}_S, \boldsymbol{G}_R, \boldsymbol{S}_{v_S v_S}, \boldsymbol{G}_{v_R v_R}) , \quad (2)$$

$$\boldsymbol{S}_{uy} = f_2(\boldsymbol{G}_S, \boldsymbol{G}_R, \boldsymbol{S}_{v_S v_S}, \boldsymbol{S}_{v_R v_R}) , \quad (3)$$

$$\boldsymbol{S}_{uu} = f_3(\boldsymbol{G}_S, \boldsymbol{G}_R, \boldsymbol{S}_{v_S v_S}, \boldsymbol{S}_{v_R v_R}) , \quad (4)$$

$$\boldsymbol{S}_{w_S y} = f_4(\boldsymbol{G}_S, \boldsymbol{G}_R) , \quad (5)$$

$$\boldsymbol{S}_{w_S u} = f_5(\boldsymbol{G}_S, \boldsymbol{G}_R) . \quad (6)$$

Das aus (2) bis (6) gebildete Matrizengleichungssystem enthält vier unbekannte Matrizen, und zwar $\boldsymbol{G}_S$, $\boldsymbol{G}_R$, $\boldsymbol{S}_{v_S v_S}$ sowie $\boldsymbol{S}_{v_R v_R}$, für die nach einer längeren Zwischenrechnung die folgenden Lösungen erhalten werden [9]:

$$\boldsymbol{G}_S^T = (\boldsymbol{S}_{w_S u})^{-1} \boldsymbol{S}_{w_S y} , \quad (7)$$

$$\boldsymbol{G}_R^T = (\boldsymbol{S}_{w_S y})^{-1} (\boldsymbol{S}_{w_S w_S} - \boldsymbol{S}_{w_S u}) , \quad (8)$$

$$\boldsymbol{S}_{v_S v_S} = \boldsymbol{S}_{yy} - \boldsymbol{G}_S^* \boldsymbol{S}_{uy} - \boldsymbol{S}_{yu} \boldsymbol{G}_S^T + \boldsymbol{G}_S^* \boldsymbol{S}_{uu} \boldsymbol{G}_S^T , \quad (9)$$

$$\boldsymbol{S}_{v_R v_R} = (\boldsymbol{I}_m + \boldsymbol{G}_R^* \boldsymbol{G}_S^*) \boldsymbol{S}_{uu} (\boldsymbol{I}_m + \boldsymbol{G}_R \boldsymbol{G}_S)^T - - \boldsymbol{S}_{w_S w_S} - \boldsymbol{G}_R^* \boldsymbol{S}_{v_S v_S} \boldsymbol{G}_R^T . \quad (10)$$

Bei Messung von $\boldsymbol{y}(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{w}_S(t)$ sind somit alle unbekannten Frequenzgang- und Spektraldichtematrizen ermittelbar. In gleicher Weise wurden die 15 Matrizengleichungssysteme für $n_m = 2$, die verbleibenden 19 Matrizengleichungssysteme für $n_m = 3$ und die 15 Matrizengleichungssysteme für $n_m = 4$ auf ihre Auflösbarkeit untersucht. Die dabei erhaltenen Ergebnisse sind in [9] enthalten und werden im folgenden Abschnitt zusammengestellt und diskutiert.

3. Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse

Bei Messung von zwei Signalvektoren, d. h. $n_m = 2$, gilt:
Die Frequenzgangmatrix der Regelstrecke ($\boldsymbol{G}_S$) ist bei bekannter Frequenzgangmatrix des Reglers ($\boldsymbol{G}_R$) identifizierbar, wenn

1. zwei Kreissignalvektoren meßbar sind, die die Regelstrecke einschließen $(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{y}(t); \boldsymbol{u}_R(t), \boldsymbol{y}(t))$ oder
2. ein Kreissignalvektor ($\boldsymbol{u}(t)$ oder $\boldsymbol{u}_R(t)$ oder $\boldsymbol{y}(t)$) und ein von außen angreifender Signalvektor ($\boldsymbol{w}_S(t)$ oder $\boldsymbol{v}_S(t)$ oder $\boldsymbol{v}_R(t)$) meßbar sind.

Dabei sind wahlweise eine oder zwei weitere Spektraldichtematrizen der von außen angreifenden Signalvektoren mit bestimmbar.

Bei Messung von drei Signalvektoren, d. h. $n_m = 3$, gilt:
Die Frequenzgangmatrizen der Regelstrecke und des Reglers ($\boldsymbol{G}_S$ und $\boldsymbol{G}_R$) sind identifizierbar, wenn

1. alle drei Kreissignalvektoren $(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{u}_R(t), \boldsymbol{y}(t))$ meßbar sind
2. zwei Kreissignalvektoren und ein von außen angreifender Signalvektor meßbar sind, wobei zwei Signalvektoren die Regelstrecke oder den Regler einschließen müssen oder
3. ein Kreissignalvektor und zwei von außen einwirkende Signalvektoren meßbar sind, wobei die zwei letzteren nicht an demselben Punkt im Regelkreis angreifen dürfen.

Dabei sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Signalvektorkombination drei, zwei oder eine Spektraldichtematrix der von außen angreifenden Signalvektoren mitbestimmbar.

Bei Messung von vier Signalvektoren, d. h. $n_m = 4$, gilt:
Die Frequenzgangmatrizen der Regelstrecke und des Reglers ($\boldsymbol{G}_S$ und $\boldsymbol{G}_R$) sind identifizierbar, wenn

1. die drei Kreissignalvektoren und ein von außen angreifender Signalvektor meßbar sind
2. zwei Kreissignalvektoren und zwei von außen einwirkende Signalvektoren meßbar sind, wobei zwei Signalvektoren die Regelstrecke oder den Regler einschließen müssen oder
3. ein Kreissignalvektor und die drei von außen angreifenden Signalvektoren meßbar sind.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Signalvektorkombination sind hierbei zwei oder eine Spektraldichtematrix der von außen angreifenden Signalvektoren mitbestimmbar.

Die obige Zusammenstellung zeigt, daß bei Messung von drei bzw. vier Signalvektoren i. allg. eine vollständige System- und Signalidentifikation garantiert ist, während bei Messung von nur zwei Signalvektoren dies nicht der Fall ist. Hier ist in Abhängigkeit von der betrachteten Signalvektorkombination stets eine bestimmte A-priori-Information über eine in dem Mehrgrößenregelkreis unbekannte Frequenzgang- oder Spektraldichtematrix erforderlich.

Deshalb ist — sofern ein dritter Signalvektor meßbar ist — für die Modellgewinnung an Mehrgrößenregelkreisen stets die Messung von drei Signalvektoren zu empfehlen, wie das z. B. bei der Korrelationsmethode der Fall ist.

Für 14 von den 20 möglichen Signalvektorkombinationen für $n_m = 3$ existiert dabei die vollständige System- und Signalidentifikation. Die hierfür zur Ermittlung der unbekannten Frequenzgang- und Spektraldichtematrizen geltenden Lösungsbeziehungen sind in [9] zusammengestellt. Von diesen scheiden für einen konkreten Anwendungsfall durch die Nichtmeßbarkeit einiger Signalvektoren (z. B. $\boldsymbol{v}_S(t)$ und/oder $\boldsymbol{v}_R(t)$) eine bestimmte Anzahl für die Modellgewinnung aus. Aus den verbleibenden möglichen Signalvektorkombinationen ist dann die „beste" auszuwählen. Dies kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, wie

— Ermittlung der Signalvektorkombination mit der einfachsten Auswerteformel für die unbekannten Matrizen, d. h. Optimierung nach rechentechnischen Gesichtspunkten
— Ermittlung der Signalvektorkombination, deren Signalvektoren am einfachsten zu messen sind, d. h. Optimierung nach meßtechnischen Aspekten
— Ermittlung der Signalvektorkombination mit den geringsten Kosten bzw. Zeitaufwand für die Messungen und die anschließende Verarbeitung, d. h. Optimierung nach ökonomischen Gesichtspunkten.

Die Festlegung, welches Kriterium zur Auswahl verwendet wird, hängt vom konkreten Anwendungsfall ab.

Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Methodik ist geeignet, unter Beachtung verschiedener technisch-ökonomischer Randbedingungen (z. B. Meßzeiten, Meßorte, Meßmittel) und Zielvorgaben für die Modellbildung (Genauigkeit der Identifikation, Nutzung der Ergebnisse, z. B. zum Entwurf oder zur Verbesserung der Automatik aufgrund abhebbarer Information über die wirksamen Signale oder zur Verbesserung und Beeinflussung technologische-r oder anlagentechnischer Komponenten) für den jeweils konkreten Anwendungsfall bereits im Stadium der Versuchsvorbereitung die günstigsten experimentellen Bedingungen zu finden.

Literatur

[1] *Herschelmann, B.; Hörig, H.-J.; Hartmann, K.:* Entwicklungsstand automatisierter Versuchssysteme in der experimentellen Forschung. msr, Berlin 21 (1978) 6, S. 310—314.
[2] *Meiling, W.; Töpfer, H.; Hörig, H.-J.:* Laborautomatisierung. Vorabdrucke, Jahrestagung der WGMA 1980, Automatisierungstechnik, Dresden 1980.
[3] *Töpfer, H.; Fuchs, H.; Willem, H.:* Moderne gerätetechnische Mittel und ihre Konsequenzen für neue Automatisierungskonzepte. msr, Berlin 23 (1980) 1, S. 2—10.
[4] *Töpfer, H.; Kriesel, W.:* Zur funktionellen und strukturellen Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik. msr, Berlin 24 (1981) 4, S. 183—188.
[5] *Rieger, P.:* Anforderungen an ein Programmier-, Service- und Inbetriebnahmegerät für einen freiprogrammierbaren Mikrorechnerregler. msr, Berlin 24 (1981) 12, S. 699—702.
[6] *Schwarz, H.:* Mehrfachregelungen, Band 1. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1967.
[7] *Bretthauer, G.:* Identifiability of time-continous MIMO closed loop systems. Preprints, 6. IFAC Symp. on Identification and System Parameter Estimation, Washington 1982.
[8] *Bretthauer, G.:* Vollständige und teilweise Identifizierbarkeit von Mehrgrößenregelkreisen. msr, Berlin 27 (1984) (in Vorbereitung).
[9] *Bretthauer, G.:* Identifikation rückgekoppelter Mehrgrößensysteme im Frequenzbereich — Einheitliche Darstellung und Vergleich der Verfahren. Dissertation B, TU Dresden 1983. msr 7962

G. A. Fomin[1])

Standard-Software für die Ausarbeitung von Dialog-Systemen zur Erfassung und Verarbeitung experimenteller Daten[2])

0. Einleitung

Hohe Effektivität in der Laborautomatisierung kann nur dann erreicht werden, wenn die Arbeitsschritte des Anwenders und die Wirkungsweise der geräte- und programmtechnischen Mittel aufeinander abgestimmt sind. Diese Abstimmung erreicht man im Dialogsystem, dessen programmtechnische Realisierung Komponenten enthalten muß, die in allen Etappen der Lösung von Aufgaben einen Dialog mit dem Forscher ermöglichen müssen. In der Praxis erfordert die Ausarbeitung eines Dialogsystems enormen Arbeits- und Zeitaufwand. Ein aktuelles Problem besteht in der Senkung des Aufwandes für die Entwicklung und Modifikation von Anwender-Programmpaketen. Die Lösung dieser Aufgabe ist wegen der Einzigartigkeit jedes Systems schwierig, was die Verwendung schon vorhandener Programmsysteme fast unmöglich macht. Außerdem enthalten viele Programmsysteme Komponenten, die in bezug auf den Forschungsgegenstand invariant sind. Dazu zählen Programme, die den Dialog mit dem Anwender gewährleisten, die Datenbasis steuern, die Forschungsergebnisse abbilden und andere.
Deshalb empfiehlt es sich, einen einheitlichen Standard für die Speicherung der Information, die bei den Untersuchungen anfällt und genutzt wird, auszuarbeiten und programmtechnische Mittel auszusuchen, die die Grundlage für die Dialogsysteme bilden und eine ausreichend einfache Abstimmung auf das Sachgebiet ermöglichen. Dieses Ziel wurde bei der Schaffung einer Standard-Software zur Entwicklung des Dialogsystems TPS-1 (tipovye programmnye sredstva) verfolgt, dessen Grundeigenschaften im folgenden betrachtet werden.

1. Anwendungsgebiet des TPS-1

Der Programmkomplex TPS-1 ist für Kleinrechner des Typs SM-4 und SM-1300 vorgesehen, aber es kann bei geringer Umarbeitung auch für andere Rechnertypen genutzt werden. Die Ausarbeitung der Programmkomponenten erfolgte auf der Grundlage der Standardversion der Programmiersprache FORTRAN-IV nach den Regeln der strukturellen Programmierung [1]. Unter Verwendung des Betriebssystems RAFOS wurden auf der SM-4 für das Einschreiben des residenten Teils des TPS-1 in den Operationsspeicher 2 K Worte benötigt.
Bei Benutzung des Dialogsystems befindet sich der größte Teil der Programme und Daten auf einer Magnetplatte, wobei der Speicherbereich bei der Generierung des Systems vorgegeben wird. Für den Dialog mit dem Anwender müssen zur Gerätetechnik ein alphanumerisches Display und ein Drucker gehören. Die Anfangsgenerierung und die Regenerierung des Systems erfolgt mit Hilfe einer Basisversion, die auf Magnet- oder Lochband abgespeichert ist.
Der Programmkomplex TPS-1 ermöglicht die Zusammenstellung von einzelnen arbeitsfähigen Programmen zu einem Dialog-Programmpaket und die Gewährleistung der Informationskompatibilität auf der Grundlage einer einheitlichen Datenbasis. Das Steuersystem des TPS-1 realisiert die willkürliche, durch den Anwender festzulegende Reihenfolge, in der die einzelnen, zum Paket zusammengestellten Programme abgearbeitet werden. Die Verbindung zum Dialog-Programmpaket erfolgt durch eine Kette von Operationen, die entsprechend den Programmen und den vom Anwender angenommenen Lösungen abgearbeitet werden. Im Bild 1 ist ein Beispiel für eine solche Kette dargestellt.
Bezüglich des TPS-1 unterscheidet man zwei Nutzerkategorien, den sogenannten „Konstrukteur" und den „Forscher". Die Aufgabe des Konstrukteurs besteht in der Erstellung des Programmpakets und in der Bedienung des Betriebssystems. Dazu ist es erforderlich, daß er Erfahrungen auf dem Gebiet der problemorientierten Programmierung und der Arbeitsweise des Rechnerbetriebssystems besitzt. Der Forscher benutzt das Programmpaket für die Lösung wissenschaftlicher Aufgaben, deshalb muß

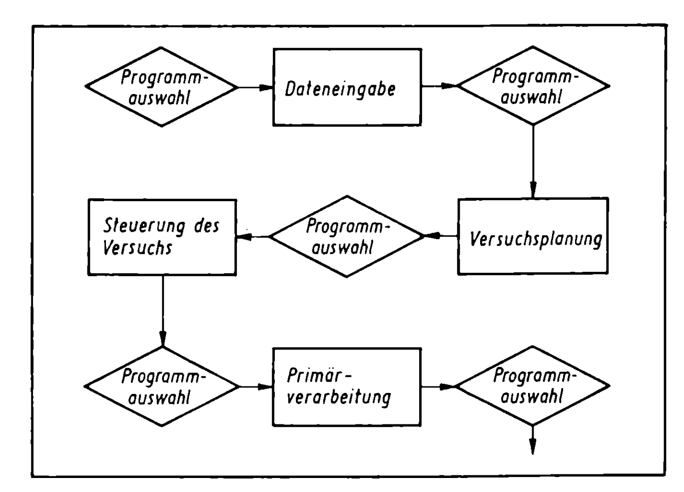


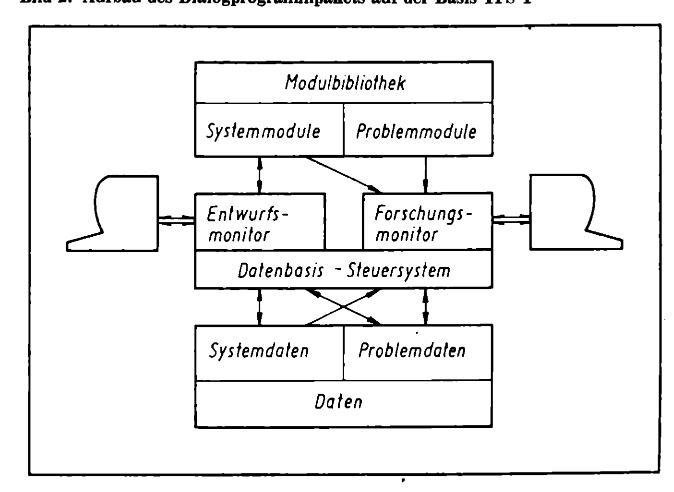
Bild 1. Kette von Operationen, die während der Untersuchung ausgeführt werden

er die funktionellen Möglichkeiten des Programmpakets kennen und die Dialogtechnik bedienen können. Er kann die Aufgaben lösen, ohne daß er die Programmierung beherrscht und ohne daß er das Betriebssystem kennt. Verfügt er aber auch über diese Kenntnisse, so hat er die Möglichkeit einer effektiveren Nutzung der Software.

2. Aufbau des Programmpakets

Die Struktur des Dialog-Programmpakets auf der Basis des TPS-1 ist im Bild 2 dargestellt.
Zu einem solchen Paket gehören die Daten, eine Modulbibliothek, ein Datenbasis-Steuersystem, ein Monitor für den Entwurf und ein Monitor für die wissenschaftlichen Untersuchungen. Die Daten werden in System- und Problemdaten unterteilt. Unter den Problemdaten versteht man die Ausgangsinformationen und die durch die wissenschaftlichen Untersuchungen erhaltenen Lösungen. Die Systemdaten enthalten alle Informationen über die Bedienung des Dialogsystems. Dazu gehört u. a. eine Lexik für den Dialog mit dem Anwender des Programmpakets. Alle Daten sind auf Magnetplatte abgespeichert und werden bei Bedarf von dort übernommen.
Die Problemmodule als Bestandteile der Modulbibliothek gewährleisten die Verarbeitung der Problemdaten. Die Systemmodule ermöglichen die Durchführung zahlreicher Service-Operationen bei der Benutzung des Dialogsystems, z. B. die Abbildung der Problemdaten auf dem Bildschirm oder Drucker in Form von Tabellen oder einer Grafik sowie die Ausgabe von Informationen über die Möglichkeiten des Dialogsystems und über die Bedienvorschriften.

Bild 2. Aufbau des Dialogprogrammpakets auf der Basis TPS-1



[1]) Doz. Dr.-Ing. *Gennadij A. Fomin* (39) studierte von 1961 bis 1967 an der Fakultät für Automatik und Telemechanik des Moskauer Energetischen Instituts (MEI). 1977 Promotion A. 1967 bis 1970 wissenschaftliche Tätigkeit am MEI. 1970 bis 1972 Gastaufenthalt in der DDR (VEB PCK Schwedt). Seit 1972 Dozent am Lehrstuhl für Automatik des MEI.

[2]) Die deutsche Bearbeitung des Beitrages wurde von Dipl.-Ing. *I. Landmann*, TU Dresden, vorgenommen.

Das Datenbasis-Steuersystem gewährleistet eine effektive Ablage der Daten in externen Speichern und den Datenzugriff sowohl vom Anwender als auch vom Programmpaket aus. Die Monitorprogramme steuern das Zusammenwirken der einzelnen Module beim Entwurf des Dialogsystems und bei dessen Nutzung.

3. Dialogprozesse im TPS-1

Beim Entwurf des Programmpakets und bei der Nutzung werden die Dialogprozesse nach einem einheitlichen Schema organisiert. Eine wichtige Rolle spielt dabei das Monitorprogramm, das dem Anwender im Dialog Kommentare und Anweisungen übermittelt oder ihm Fragen stellt. Die Kommentare enthalten Informationen, die der Nutzer wissen muß, die aber von ihm keine Antwortreaktionen fordern. Als Antwort auf eine Anweisung muß der Nutzer eine vorgeschriebene Handlung vollführen. Für jede vom Programm vorgegebene Frage existieren mehrere gültige Varianten für die Antwort, die mit einem Digitalkode versehen sind. Zur Beantwortung einer Frage muß der Nutzer den Kode der ausgewählten Antwort eingeben. In der Regel geben die Antworten Auskunft über die weiteren Arbeitsschritte des Monitors.
In jeder Etappe des Dialogprozesses kann der Nutzer statt der zu erfolgenden Reaktion auf die aktuelle Frage oder Anweisung vom Monitor die Ausführung folgender Arbeitsschritte fordern:

- Bereitstellung von Zusatzinformationen, die für den Lösungsentscheid benötigt werden
- Rückkehr zu einer vorangegangenen Frage oder Anweisung zwecks Änderung einer bereits getroffenen Entscheidung
- Änderung des Dialogtempos, d. h. Übergang von einer ausführlicheren Form des Dialogs zur verkürzten oder umgekehrt
- Ausgabe des Dialogprotokolls auf dem Drucker bzw. Abbruch der Ausgabe
- Unterbrechung der Verbindung zum Dialogsystem.

Bei der verkürzten Dialogform trifft der Monitor entsprechend den Systemvereinbarungen selbständig die Entscheidung für die ausgelassenen Dialogelemente. Das Monitorprogramm führt eine Syntax-Kontrolle der vom Nutzer eingegebenen Antworten durch und wiederholt die Fragen bei fehlerbehafteten Antworten. Alle Dialogtexte sind in einem Datenmassiv auf Magnetplatte abgespeichert und können beim Programmentwurf verändert bzw. ergänzt werden. Dadurch wird z. B. auch eine Änderung der Dialogsprache ermöglicht.

4. Entwurf des Dialogsystems

Der Entwurf des Dialogsystems umfaßt Operationen, die mit Hilfe des Betriebssystems des Rechners ausgeführt werden, sowie Operationen, die der Entwurfsmonitor abarbeitet. Das Betriebssystem des Rechners schafft Datenmassive zur Speicherung der Daten, prüft die Problemprogramme auf ihre Funktionstüchtigkeit und stellt das Programmpaket zusammen. Der Kopfmodul jedes im Programmpaket enthaltenen Problemprogramms muß nach bestimmten Instruktionen, die vom Programmierer vorgegeben werden und nicht allzu kompliziert sein sollten, formuliert werden. Alle anderen Module sind willkürlich erstellbar.
Der Entwurfsmonitor nimmt eine erste Aufstellung des Datenmassivs vor, gibt die Systemdaten ein und beschreibt die sogenannten Sachgebietsmodelle [2]. Bei der Anwendung des Dialogsystems kann durch die Eingabe neuer Problemprogramme und Daten in das Programmpaket dessen Sachspezifik erweitert werden.

5. Bearbeitung von wissenschaftlichen Aufgaben im Dialogsystem

Der Aufruf des Anwendermonitors erfolgt über Anweisungen des Betriebssystems. Zu Beginn des Dialogs wird vom Nutzer ein Schlüsselwort abgefragt, das den Zugriff zu einer bestimmten im System gespeicherten Datenmenge ermöglicht. Bei Nichtangabe dieses Schlüsselwortes werden die Problemdaten nur für die Zeit des gegenwärtig vorhandenen Kontaktes zum Programmpaket gespeichert. Danach wählt der Anwender die Betriebsart des Dialogsystems. Bei autonomer Arbeitsweise erhält er unter Benutzung des Datenbasis-Steuersystems die Möglichkeit zur Dateneingabe, -ausgabe und -korrektur. In der Betriebsart „Auswahl des Problemprogramms" erfolgt die Datenverarbeitung mit Hilfe der Programme des Dialogsystems. Der Anwendermonitor kontrolliert die Vollständigkeit der Eingangsdaten und fordert bei Notwendigkeit die noch fehlenden Daten an. Nach Beendigung der Berechnungen wird im Dialog mit dem Anwender festgelegt, ob die Rechenergebnisse in den Datenmassiven abgespeichert werden sollen. Die Betriebsart „Datenanalyse" gibt dem Anwender die Möglichkeit, eine grafische Darstellung der Daten auf dem Bildschirm oder auf dem Drucker zu erhalten.
Nach Abschluß dieser Operationen erhält der Anwender vom Monitor die Aufforderung, die Art der weiteren Abarbeitung auszuwählen. Diese Wahl der Betriebsart gibt jeweils nur einen Arbeitsschritt vor, wobei die Gesamtzahl der Arbeitsschritte unbegrenzt ist. Der Anwender kann den Dialog an beliebiger Stelle abbrechen.
Auf der Grundlage der Standard-Software TPS-1 wurden Dialogsysteme für die statistische Datenauswertung, für die Versuchsplanung und für die Schätzung der ökonomischen Kennziffern von Systemen zur Laborautomatisierung geschaffen. Die Anwendung dieser Programmpakete hat die hohe Effektivität des Dialogsystems TPS-1 bestätigt.

Literatur

[1] *Hughes, J. K.; Michtom, J. I.:* Strukturnyj podchod k programmirovaniju (Strukturelles Herangehen an die Programmierung. Übers. a. d. Engl.). Moskva: Mir 1980
[2] *Tamm, B. T.; Tyugu, È. Ch.:* Pakety programm (Programmpakete). Izvestija AN SSSR. Techničeskaja kibernetika (1977) 5, str. 111–124.
[3] *Močalova, L. A.; Polotnov, M. M.; Fomin, G. A.; Fomina, E. S.:* Tipovye programmnye sredstva konstruirovanija dialogovych paketov programm na baze SM ÈVM (Standard-Software zur Schaffung von Dialogprogrammpaketen für Rechner vom Typ SM). Meževuzovskij sbornik, Moskva: Moskovskij ėnergetičeskij institut (1982) 4, str. 65–78. msr 7958

(Fortsetzung von Seite 56)

Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß, ausgehend vom wesentlich gesteigerten Leistungsvermögen der CNC-Steuerung, Programmierfunktionen mit beachtlichem Effekt in die CNC-Steuerung verlagert werden können. Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde das vom Hersteller bereitgestellte Leistungsvermögen softwaremäßig ausgebaut und damit ein über die serienmäßig verfügbaren CNC-Steuerungen für das Fräsen hinausgehender Leistungsumfang verwirklicht.

Literatur

[1] *Burkhardt, B.; Fichtner, D.; Krippner, K.; Otto, Ch.; Zehe, K.-H.:* Fertigungstechnische Aspekte hochproduktiver Fräsbearbeitung für geometrisch komplizierte Teile. TU Dresden, INFERT 82, Vortrag der Fachsektion II.
[2] *Kochan, D.:* Fertigungsprozeßgestaltung und Informationsverarbeitung. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
[3] *Eißner, A.:* Untersuchungen zur Komplettbearbeitung analytisch einfach beschreibbarer Flächen unter Ausnutzung des Leistungsvermögens der CNC-Steuerung. Diplomarbeit, TU Dresden 1982. msr 7966

(Fortsetzung von Seite 83)

Schlußfolgerungen

Wenn die dynamischen Eigenschaften des Objekts nicht bekannt sind, dann wird das Problem bedeutend schwieriger. In diesem Fall ist die Dualsteuerung des Versuchs angebracht. Ausgehend von dieser Konzeption können zwei Lösungsvarianten vorgeschlagen werden:

- Bestimmung des vollständigen dynamischen Modells (Versuchspläne dieser Art sind bekannt [3])
- Annahme wie bisher, daß die Dynamik störend wirkt und ihre Untersuchung nur in dem Maße vorgenommen wird, daß die negative Beeinflussung der Genauigkeit der Schätzung des statischen Regressionsmodells möglichst minimal wird.

Literatur

[1] *Krug, G. K.; Borčaninov, M. G.:* Programmnye systemy dlja rešenija zadač statističeskoj obrabotki resul'tatov issledovanij i planirovanija eksperimenta v ASNI (Programmsysteme zur Lösung von Aufgaben der statistischen Verarbeitung von Forschungsergebnissen und der Versuchsplanung in ASNI). Voprosy Kibernetiki, Bd. Planirovanije i avtomatizacija eksperimenta v naucnych issledovanijach (1982), S. 37–46
[2] *Fedorov, V. V.:* Teorija optimal'nogo eksperimenta (Theorie des optimalen Experiments). Moskva: Nauka 1971.
[3] *Krug, G. K.; Sosulin, Ju. A.; Fatujev, V. A.:* Planirovanije eksperimenta v zadačach identifikacii i ekstrapoljacii (Versuchsplanung bei Identifikations- und Extrapolationsaufgaben). Moskva: Nauka 1977. msr 7959

„Tage der Wissenschaft und Technik" an der Ingenieurhochschule Wismar

Vom 14. bis 16. September 1983 fanden an der Ingenieurhochschule Wismar die „Tage der Wissenschaft und Technik" statt. In diesem Jahr waren sie dem Jubiläum „75 Jahre Ingenieurausbildung in Wismar" gewidmet. Das Programm der Sektion Technologie der Elektrotechnik/Elektronik zum Gesamtthema „Verfahren zur Informationsübertragung und Probleme der Technologie und Zuverlässigkeit in der Mikroelektronik" wurde vom Wissenschaftsbereich Informationstechnik gestaltet. Den fünf Hauptvorträgen am ersten Tag folgten am darauffolgenden Tag die Fachvorträge in den Sektionen

- A Moderne Verfahren zur Informationsübertragung
- B Technologische Probleme der Mikroelektronik
- C Anwendung und Zuverlässigkeit der Mikroelektronik.

Zum Abschluß der wissenschaftlichen Veranstaltung wurde den Gästen die Möglichkeit geboten, die für Lehre und Forschung genutzten Labore der Nachrichtentechnik, Technologie und Mikrorechentechnik zu besichtigen.
Über die Hälfte der 80 auswärtigen Teilnehmer kamen aus der Industrie, während die übrigen Gäste aus Universitäten, Hochschulen und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen angereist waren. Das zunehmende Interesse am Meinungsaustausch zu wissenschaftlich-technischen Problemen zeigt sich auch an der großen Anzahl von Gastvorträgen.
Der erste Hauptvortrag wurde von *H. Pohlers* (IH Wismar) zum Thema „Stand und Entwicklungstendenzen der Lichtleiter-Nachrichtenübertragung" gehalten. Einem Überblick über die Einsatzgebiete der Lichtleitertechnik folgten detaillierte Ausführungen zur Lichtleiter-Nachrichtenübertragungstechnik. Es wurde besonders auf die Entwicklung des Mediums Lichtleiter und die Bemühungen eingegangen, sehr niedrige Dämpfungswerte in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu erreichen. Am Beispiel der verschiedenen Generationen der Lichtleiter-Übertragungssysteme erläuterte der Referent die für die Weiterentwicklung der Lichtleiter-Nachrichtentechnik zu lösenden technischen, technologischen und ökonomischen Aufgaben.
H. Eigler (IH Mittweida) berichtete über theoretische Überlegungen und Experimente zur Realisierung von CCD-NF-Transversalfiltern. Ausgehend von der technischen Charakterisierung und Bewertung leitete er die konstruktiven Bedingungen, die den CCITT-Empfehlungen genügen, für diese Filter ab.
L. Auer (INT Berlin) sprach über den Einfluß der Integrationstechniken auf die Effektivität der Fertigung nachrichtentechnischer Erzeugnisse. Der Einsatz einer großen Anzahl von Kundenschaltkreisen in der Vermittlungstechnik erfordert neue, zeitsparende Methoden bei der Schaltkreisentwicklung und in Verbindung mit der Verwendung von Chips eine neue Montagetechnologie.
G. Fritzsche und *M. Gromak* (HfV „Friedrich List" Dresden) entwickelten in ihrem Vortrag „Probleme der adaptiven Echokompensation" auf der Grundlage der zeitdiskreten Netzwerk- und Systemtheorie Varianten der modernen Echokompensation. Im Zusammenhang mit der Vorstellung des Funktionsmusters eines Echokompensators und des darin enthaltenen, mittels CMOS-RAMs realisierten adaptiven Filters wurden die Vorteile des Verfahrens gegenüber bisher angewendeten Prinzipien herausgearbeitet.
Ch. Hälsig (VEB Elektronische Bauelemente Teltow) sprach über die Bedeutung der Mikroelektronik-Technologie für die Entwicklung frequenzselektiver Bauelemente. Ausgehend von den Vorteilen mechanischer Bandfilter gegenüber den rein elektrischen Filterbauelementen wurden die Metallresonatorfilter, die monolithischen Quarzfilter und die akustischen Oberflächenwellen-Filter auf Möglichkeiten einer umfassenden Anwendung von Technologien der Mikroelektronik untersucht. Den mikroakustischen Bauelementen wurde die größte Perspektive vorausgesagt.
In der Sektion A waren die meisten Vorträge den Problemen der Lichtleitertechnik gewidmet. Ein Bericht darüber erscheint in der Zeitschrift Nachrichtentechnik/Elektronik. Über die Sektion B, in der sich die Vortragenden mit unterschiedlichsten Verbindungstechnologien, mit Materialeigenschaften und -bearbeitungstechnologien beschäftigten, wird in der Zeitschrift Feingerätetechnik berichtet.
Über die Vorträge der Sektion C soll an dieser Stelle berichtet werden:
Diese lassen sich in die Themenkomplexe

- Mechanisch-dynamische Beanspruchung, deren Bestimmung und Auswirkung auf Bauelemente und Systeme
- Praktikable Verfahren zur Ermittlung der Zuverlässigkeit von Systemen
- Spezielle Probleme der Anwendung von Mikrorechnern

einordnen.
In der Mehrzahl der Vorträge wurde über die Darstellung der theoretischen Zusammenhänge hinausgegangen und besonders die praktische Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse aufgezeigt.
H.-E. Singer (IH Zwickau) stellte in seinem Vortrag „Mechanische und klimatische Beanspruchung elektronischer Bauelemente beim Einsatz im Kraftfahrzeug" die in der TGL 5003 enthaltenen Forderungen an die Bauelemente den im Ergebnis von Messungen ermittelten Beanspruchungen gegenüber und leitete Kriterien für den Bauelementeeinsatz im Kfz ab.
J. Rehnitz (IH Wismar) beschäftigte sich im Zusammenhang mit der Neufassung der TGL 200-0057/06 und /07 und der Verschärfung der Toleranzforderungen bei Stoßprüfungen mit Problemen der Stoßerzeugung und Stoßmessung. Als geeignete Prüf- und Meßmittel wurden der Stoßprüfstand ST 800 (TIW Rauenstein), die piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer KD 33 und KS 50 (METRA Radebeul) und das Stoßmeßgerät 00 034 (ROBOTRON-Meßelektronik) empfohlen.
Im Mittelpunkt des Vortrages „Bestimmung des Schadensverhaltens realer mechanischer Bauelemente bei Erregung mit typischen Prüfanregungen" von *K. Leuschner* (IH Wismar) stand eine neue Methode zur mathematischen Bestimmung der Wöhler-Linie. Auf der Grundlage eines nichtlinearen Schadenskonzepts wurde ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Bruchlastwechselzahl und Bruchenergie hergeleitet.
L. Barthel (IH Wismar) wertete Experimente mit statischer und dynamischer Belastung zur Bestimmung des Dämpfungsverhaltens einfacher Feder-Masse-Systeme aus. Im Ergebnis der theoretischen und praktischen Untersuchungen wurden Aussagen zur Anwendung von Energiebeziehungen für die Beschreibung der Dämpfung und zur Modellierung der Dämpfungselemente gemacht.
O. Kindt (IH Wismar) erläuterte am Beispiel von Tastenschaltern und Steckkontakten die Ergebnisse systematischer Untersuchungen zur Funktionssicherheit von Kontaktbauelementen bei mechanisch-dynamischer Beanspruchung. Den Arbeiten, die das Erkennen von Schwachstellen der untersuchten Objekte zum Ziel hatten, wurde eine quasistatische Betrachtungsweise zugrunde gelegt.
H. Böttcher (IH Wismar) diskutierte im Vortrag „Quasilineare Feldbeanspruchungsanalyse" die Ursachen für die im Vergleich zu in Kraftfahrzeugen aufgezeichneten realen Beanspruchungen bei äquivalenten Ermüdungsuntersuchungen im Labor notwendigen wesentlich höheren mechanisch-dynamischen Beanspruchungen. Die Verwendung einer modifizierten Verteilungsfunktion für die Spitzenwerte der Anregungsbeschleunigung wurde als effektiver Weg zur realistischeren Angleichung von Feld- und Prüfbeanspruchung genannt.
U. Gratz (IH Wismar) stellte die neue transistorisierte Schwingprüfanlage TSA 1200 vor. Der dafür entwickelte Leistungsverstärker wurde nach dem ISO-Standard 5344 erprobt. Die Dokumentation für den Leistungsverstärker liegt im Schwingprüflabor der IH Wismar vor.
H. Schubert (IH Wismar) ging im Vortrag „Methoden zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Geräten und Anlagen der Informationstechnik" von einem Vergleich der bekannten Verfahren zur Zuverlässigkeitsberechnung von Strukturmodellen hinsichtlich Anwendungsbreite, Handhabbarkeit und

Vermeidbarkeit von Fehlern aus. Am Beispiel einer mehrfach vermaschten Struktur wurde, ausgehend von Karnaugh-Diagramm, das programmierbare Vereinfachungsverfahren nach *Quine-Mc Clusky* zur Minimierung der Systemlebensdauerfunktion vorgestellt.

T. Pohley (IH Wismar) sprach über Möglichkeiten und Grenzen der Hardware-Simulation bei der Untersuchung des Lebensdauerverhaltens von Systemen. Im Mittelpunkt des Vortrages standen ein spezieller Hardware-Simulator, die Modellierung des Verhaltens der Systemelemente, die Modellierung einfacher Zuverlässigkeitsstrukturen und die Ergebnisse durchgeführter Simulationsbeispiele.

M. Krüger (VEB Deutfracht/DSR Rostock) diskutierte die Frage „Universeller Großrechner oder spezieller Simulator zur Simulation diskreter hafenbetrieblicher Prozesse?" Es wurden die in der DDR existierenden Simulationssysteme mit bedienungstheoretischem Konzept im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit zur Untersuchung des Mengen-Zeit-Verhaltens und der Zuverlässigkeit der Prozesse beim Stückgutumschlag gewertet. Für die Lösung der anstehenden Probleme bei geringem Zeit-, Personal- und Materialaufwand werden aus derzeitiger Sicht Mehrrechnersysteme mit raumgeteilten Busstrukturen die effektivsten Simulatoren sein.

T. Lorenz (IH Wismar) beschäftigte sich im Vortrag „Fehlerdiagnose und Eigenüberwachung in Mikrorechnersystemen" ausführlich mit den an die Testsoftware zu stellenden Forderungen. Es wurden Beispiel-Testprogramme vorgestellt, die verdeutlichen, daß durch wesentliche logische Verknüpfungen ein Minimum an Tests im Testprogramm ausreichend ist.

Gegenstand des Vortrags von *H.-B. Bemmann* und *F. Wiebel* (IH Mittweida) war die Reduzierung der Fehlersuchzeiten durch Anwendung rechnergestützter Diagnoseverfahren. Es wurde besonders auf die technische Realisierung und die Vorzüge des In-Circuit-Tests bezüglich Prüfzeit und Software-Herstellung eingegangen und die hohe Effektivität dieses Testverfahrens herausgearbeitet.

W. Winter (IH Wismar) sprach über die „Bestimmung des bei Kopplung von mehreren U 880-Rechnern über ein zeitgeteilt benutztes Bussystem erreichbaren Befehlsdurchsatzes mittels digitaler Simulation". Zur Ermittlung der Durchsatzwerte wurde ein digitales Simulationsverfahren entwickelt, das auf einer programmtechnischen Modellierung des Verhaltens der gekoppelten Rechner und der Bussteuerung beruht. Im Ergebnis der Simulation wurde der Verlauf des Befehlsdurchsatzes in Abhängigkeit von der Häufigkeit der über den Globalbus ablaufenden Zyklen bei verschiedener Rechneranzahl (bis $n = 10$) gewonnen.

W. Thiel (IH Wismar) analysierte die Befehlsstruktur des Mikroprozessors U 880 D, erläuterte die bei der Testung aller Befehlskode gefundenen, im Befehlssatz nicht enthaltenen logisch sinnvollen Befehle und zeigte an Beispielen deren Anwendungsmöglichkeiten auf. Die Anwendung der zusätzlichen Befehle kann Vorteile bezüglich der Programmlaufzeit und des Speicherplatzbedarfes erbringen.

Der Vortrag von *K. Hagen* (IH Wismar) zum Thema „Mikrorechnergestützte Portalkranpositionierung" beinhaltete Erfahrungen beim Rechnereinsatz zur Positionierung von Containern in drei Ebenen, wobei Übersichtlichkeit und Sicherheit im Dialog Bordrechner — Kranfahrer eine wesentliche Rolle spielten.

msr 8015 *H. Schubert*

msr LESERZUSCHRIFT

Diskussionsbemerkung zum Beitrag „Z-Transformation und kontinuierliche Systemreaktion" von F. Bening

Die in [1] behandelte Aufgabe läßt sich übersichtlicher und allgemeiner, nämlich für eine beliebige Impulsform $f(t)$ ohne $\delta(t)$-Anteil, in folgender Weise lösen.

Das Ausgangssignal im z-Bereich ist (vgl. (15) in [1])

$$A(z;\varepsilon) = G(z;\varepsilon)\, E(z)\,,$$

dabei ist

$$G(z;\varepsilon) = \mathfrak{S}\,[F(p)\, G_0(p)]$$

die diskrete Übertragungsfunktion der Reihenschaltung des Übertragungsgliedes mit einem Formierglied, das die Impulsform $f(t)$ aus einem Impuls $\delta(t)$ erzeugt. Diese Reihenschaltung hat als Gewichtsfunktion die Faltung

$$g(t) = f(t) * g_0(t)\;;$$

darin ist $g_0(t)$ die Gewichtsfunktion des betrachteten Gliedes, insbesondere

$$g_0(t) = e^{p_0 t}$$

bei einem Glied 1. Ordnung mit

$$G_0(p) = \frac{1}{p - p_0}\,.$$

Für dieses Glied lauten die abgetasteten Werte von $g(t)$

$$g(\varepsilon T) = z_0^{\varepsilon} F(p_0;\varepsilon)$$

$$g\,[(n+\varepsilon)\,T] = z_0^{n+\varepsilon} F(p_0) \qquad (n \geqq 1)$$

mit den Abkürzungen $z_0 = e^{p_0 T}$;

$$F(p_0;\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon T} e^{-p_0 t} f(t)\, dt\;;$$

$$F(p_0) = F(p_0;1)$$

Hieraus ergibt sich durch Reihensummation die diskrete Übertragungsfunktion

$$G(z;\varepsilon) = \mathfrak{S}\left[\frac{F(p)}{p-p_0}\right] = z_0^{\varepsilon}\left[F(p_0;\varepsilon) + F(p_0)\,\frac{z_0}{z - z_0}\right],$$

vgl. die gleichwertige Gl. (2.66) in [2]. Eine Erweiterung auf Glieder mit Mehrfachpolen und Paaren konjugiert-komplexer Pole und damit — über eine Partialbruchzerlegung — auf Glieder mit beliebiger gebrochen-rationaler Übertragungsfunktion $G_0(p)$ ist ohne Schwierigkeit möglich.

Im Falle der vom Verfasser betrachteten Rechteckimpulsfolge und eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung

$$G_0(p) = \frac{1}{1 + pT_0}$$

ist

$$F(p_0;\varepsilon) = \begin{cases} (z_0^{-\varepsilon} - 1)\, T_0 & \text{in } 0 \leqq \varepsilon \leqq m \\ (z_0^{-m} - 1)\, T_0 & \text{in } m \leqq \varepsilon \leqq 1 \end{cases}$$

und damit

$$G(z;\varepsilon) = \begin{cases} 1 - z_0^{\varepsilon} + \dfrac{z_0^{1+\varepsilon-m}(1 - z_0^{m})}{z - z_0} & \text{in } 0 \leqq \varepsilon \leqq m \\[2ex] z_0^{\varepsilon-m}(1 - z_0^{m})\,\dfrac{z}{z - z_0} & \text{in } m \leqq \varepsilon \leqq 1 \end{cases}$$

Mit dem Einheitssprungsignal $E(z) = z/(z-1)$ folgt schließlich

$$a[(n+\varepsilon)\,T] = \begin{cases} 1 - z_0^{\varepsilon} + z_0^{1+\varepsilon-m}(1 - z_0^{m})\,\dfrac{1 - z_0^{n}}{1 - z_0} & \text{in } 0 \leqq \varepsilon \leqq m\,, \\[2ex] z_0^{\varepsilon-m}(1 - z_0^{m})\,\dfrac{1 - z_0^{n+1}}{1 - z_0} & \text{in } m \leqq \varepsilon \leqq 1 \end{cases}$$

in Übereinstimmung mit (21.2) aus [1], während (21.1) fehlerhaft ist, wie man durch Einsetzen von $n = 0$ erkennt.

Bei der allgemeinen Impulsform f(t) erhält man für $G_0(p) = \dfrac{1}{p - p_0}$

$$a\,[(n+\varepsilon)\,T] = z_0^{\varepsilon}\left[F(p_0;\varepsilon) + F(p_0)\, z_0\,\frac{1 - z_0^{n}}{1 - z_0}\right]$$

in $0 \leqq \varepsilon \leqq 1$.

Literatur

[1] *Bening, F.:* Z-Transformation und kontinuierliche Systemreaktion. msr, Berlin 26 (1983) 8, S. 447 — 450 und 458.

[2] *Zypkin, Ja. S.:* Theorie der linearen Impulssysteme. Berlin: VEB Verlag Technik 1967.

msr 7998 Prof. Dr. sc. techn. *H. L. Burmeister*, TU Dresden, Sektion Informationstechnik, WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerung

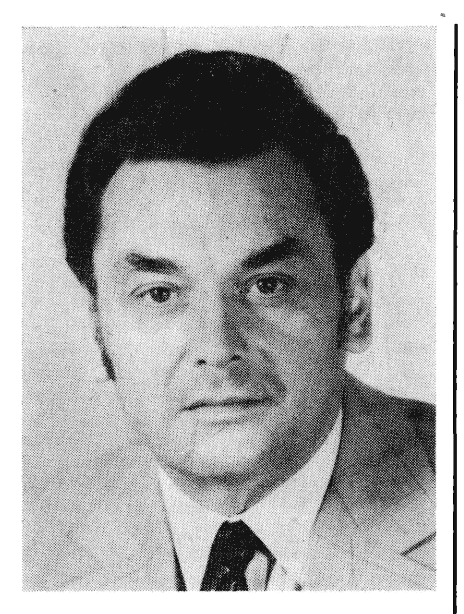


Obering. Karl-Horst Nagel 70 Jahre

Obering. *K.-H. Nagel* vollendete am 29. Dezember 1983 sein siebzigstes Lebensjahr. Seit 30 Jahren ist er Leiter eines Werbezentrums des Industriebereiches Elektronik/Elektrotechnik/Automation. Aufgrund seiner heute noch vielseitigen Tätigkeiten und Erfolge ist er ein auf seinem Gebiet national und international geachteter und anerkannter Fachmann.
Hält man mit *K.-H. Nagel* Rückschau auf seine bisherige dreißigjährige Tätigkeit für die Werbung auf dem Gebiet der Automatisierung, dann erlebt man auf diesem Wege gleichzeitig nochmals die Entwicklung der Automatisierungsgerätetechnik in der DDR. Der Jubilar hat bestimmende und erfolgreiche Arbeiten für die Popularisierung und Förderung der Anwendung der Automatisierungstechnik geleistet. Wer ihn kennt, weiß, daß er seine Arbeit stets mit außerordentlichem Engagement wahrgenommen hat. Seine Kontakte reichen von Geräteproduzenten über die Anwender bis hin zur aktiven Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Einrichtungen der Automatisierungstechnik. Er erwies Neuentwicklungen auf Messen und Ausstellungen stets seine besondere Förderung. Die Aktivitäten von *K.-H. Nagel* sind weit gespannt, sie reichen von der Mitbegründung der Zeitschrift „messen — steuern — regeln" und der „Technischen Information des VEB GRW Teltow" bis zur Mitwirkung als Initiator bei der Herausgabe von Fachliteratur. So entstanden in Zusammenarbeit mit dem Verlag Technik 6 Fachbücher. Mit der Idee zu dem Regelkreiszeichen, das nicht nur Produkten der Automatisierungstechnik, sondern auch den Bänden der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK Symbol ist, setzte sich *K.-H. Nagel* eine bleibende Erinnerung.

Der Redaktionsbeirat und die Redaktion der Zeitschrift „messen — steuern — regeln" wünschen ihrem langjährigen bewährten Mitglied Karl-Horst Nagel weiterhin fachliche Erfolge bei bester Gesundheit.

msr 8012 *H. Töpfe*



Doz. Dr. sc. techn. J. Zaremba berufen

Mit der Berufung von Herrn Dozent Dr. sc. techn. *Jürgen Zaremba* mit Wirkung vom 1. September 1983 zum außerordentlichen Professor wurde das verdienstreiche Wirken eines auch der Automatisierungstechnik verbundenen Hochschullehrers der Humboldt-Universität zu Berlin gewürdigt.
Professor *Zaremba* (Jahrgang 1936) studierte als Schüler von Prof. *Kurt Schröder* Mathematik an seiner späteren Wirkungsstätte und war danach (1959 bis 1970) im Verkehrswesen der DDR am Aufbau und der Anwendung der adäquaten Rechentechnik maßgeblich beteiligt. Daraus abgeleitete Problemstellungen lagen auch seinen Dissertationen A (1966) und B (1974) zugrunde.
Als Lehrbeauftragter der TU Dresden war er langjährig in der Ausbildung von Physikern und Ingenieuren für Maschinenbau und Elektronik im Fern- und Abendstudium tätig.
1970 als Dozent für das Fachgebiet elektronische Datenverarbeitung an die Humboldt-Universität zu Berlin berufen, gehört er zu den Mitbegründern der Sektion Elektronik an dieser Einrichtung. Er war dort mit dem Aufbau der Lehre befaßt und hielt Vorlesungsreihen über verschiedene mathematische und vor allem rechentechnische Disziplinen. Seine Lehrveranstaltungen zeichnen sich durch besondere Klarheit und methodische Darbietung aus und werden von allen Studenten hoch geschätzt.
Hervorzuheben ist seine frühzeitige Beschäftigung mit Fragen der Mikrorechentechnik. Hier hat er mit der Entwicklung spezieller Mikrorechnerlösungen wesentliche Voraussetzungen geschaffen und durch ein besonderes Engagement in der Aus- und Weiterbildung einen hohen Anteil an der Qualifizierung der 1. Generation von Erfahrungsträgern auf dem Gebiet der Mikrorechentechnik, zu denen auch viele Automatisierungstechniker gehören.
Zu den hervorragenden Leistungen in der Forschung zählt einmal die Entwicklung eines nach einem neuartigen Prinzip arbeitenden kostengünstigen Hybridrechners, auf dessen Lösung zwei Patente erteilt wurden. Damit können Probleme der Automatisierungstechnik günstig gelöst werden. Weitere Arbeiten gelten der Entwicklung von Hard- und Software für lokale Rechnernetze mit optoelektronischer Informationsübertragung mit dem Entwicklungsziel rein optischer Rechner. In diesen anspruchsvollen Projekten kommen sein ausgeprägtes Streben nach neuartigen Lösungen sowie eine hohe Kreativität zum Ausdruck. Hierbei verstand er es ebenfalls, leistungsfähige Mitarbeiter zu begeistern und zu hohen Ergebnissen zu führen.
Aus seiner Feder stammen etwa 66 Arbeiten sowie Bearbeitungen enzyklopädischer Werke.

Seine Fachkollegen und die Redaktion „msr" wünschen Herrn Prof. Zaremba auch weiterhin ungebrochene Schaffenskraft und viel Erfolg.

msr 8014 *W. Welle*

Angewandte Anlagenautomatisierung — Regelung thermischer Prozesse. Von *W. Teichmann.* 1. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik 1983. 268 Seiten, 303 Bilder, 19 Tafeln, Ganzleinen, 28,— Mark.
Bestell-Nr.: 553 191 3

Zweifellos ist das Angebot an wertvoller Fachliteratur auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik und auch der speziellen Regelungstechnik für die Lehre an Hoch- und Fachschulen und für die industrielle Praxis umfangreich vorhanden. Geht man aber davon aus, daß bei wärmetechnischen Prozessen Primärenergieträger noch in Größenordnungen uneffektiv genutzt werden, der dadurch entstehende volkswirtschaftliche Verlust nur durch eine sinnvoll realisierte Automatisierungskonzeption in Grenzen gehalten werden kann, kommt dem Buch von Prof. *Teichmann* speziell für große Elektroenergieerzeugeranlagen besondere Bedeutung zu. Mit diesem Buch, das allerdings auf einem fundamentierten Grundwissen der Automatisierungstechnik aufbaut, gibt der Autor allen an der Entwicklung und Betriebsführung der Automatisierungstechnik Beteiligten wertvolle praktische und theoretische Hinweise. Auch dem Studenten wird mit diesem Buch ein Material in die Hand gegeben, sich in dieses umfangreiche und interessante Fachgebiet einzuarbeiten und mit Hilfe der angegebenen Spezialliteratur bei Erfordernis Kenntnisse zu vertiefen.
Die praxisorientierte, anschauliche Darstellung der Probleme, die Stoffauswahl insgesamt und der Umfang und Inhalt der einzelnen Kapitel läßt die Erfahrungen des Autors aus der industriellen Tätigkeit und auf lehrmethodischem Gebiet als Hochschullehrer erkennen. Das ist zweifellos für alle, die dieses Buch in die Hand nehmen, von großem Nutzen; dabei wirkt das umfangreiche Literaturverzeichnis lernorientierend, und es ist kein Problem, Ergänzungsliteratur zu finden.

Schon im Vorwort läßt der Autor seine Haltung zur Energiewirtschaft und somit zur Kraftwerkstechnik erkennen. Ausgehend davon zieht sich durch alle Kapitel dieses Buches die Erkenntnis, daß die Beherrschung der komplizierten Anlagentechnik der Elektroenergieerzeugeranlagen eine weitestgehend zuverlässige Automatisierung der Bedien-, Überwachungs- und Registrierprozesse erfordert. Damit wird die Bedeutung der Anlagenautomatisierung unterstrichen und eine bestehende Lücke auf diesem Gebiet der Fachliteratur geschlossen, was nicht ausschließt, eher bedingt, daß auf diesem Gebiet weitere Literaturerarbeitung erfolgen sollte.
Die Darstellung ausgewählter Grundlagen im Kapitel 2 ist konzentriert und übersichtlich.

Die Darstellung der Hauptregelkreise im Kapitel 3 deutet die Kompliziertheit dieser Automatisierungstechnik an und zwingt jeden Entwickler und Betreiber, sich dieser relevanten Automatisierungseinrichtung mit prognostischem Weitblick zu widmen. Damit ist ein „Lernzwang" für Fachmann und Studenten gegeben, der einen wertvollen Aspekt dieses Buches unterstreicht. Das komplizierte Gebiet der Regelung von Dampfturbinen im Kapitel 4 ist umfangreich abgehandelt und zeugt davon, mit welcher Intensität auf diesem Gebiet Forschungsarbeit betrieben wird und wie praktische Erfahrungen in die komplizierten theoretischen Prozesse eingeschliffen werden können.
Abschließend kann eingeschätzt werden, daß nicht nur für Elektroenergieerzeugeranlagen, deren Betrieb und Entwicklung dieses Buch wertvoll ist, sondern auch für alle wärmetechnischen Anlagen in allen Industriezweigen Hinweise, Erfahrungen, Beispiele und Konzeptionen abhebbar und für die jeweilige Anlagenspezifik aufbereitbar sind.

B 1847 *D. Schwadtke*

Mikrorechner in der Meßtechnik. Von *Chr. Löber* und *G. Will.* Berlin: VEB Verlag Technik 1983. 236 Seiten, 226 Bilder, 11 Tafeln, 33,— Mark.
Bestell-Nr. 553 093 7

Heute werden vom Entwickler elektronischer Meßgeräte Kenntnisse in der Erarbeitung von Software, vom Anwender Fähigkeiten im Umgang mit Software erwartet. Das Buch beschäftigt sich mit diesen Problemen, nämlich dem Einsatz der Mikrorechentechnik zur Lösung von Aufgaben der elektronischen Meßtechnik.
Im ersten Drittel des Buches werden zunächst in Kapitel 1 Aufbau und Wirkungsweise von Mikrorechnern speziell am Beispiel der Schaltkreisfamilie U 880 D bzw. des Mikrorechners K 1520 dargelegt. Bereits das zweite Kapitel befaßt sich dann mit typischen Meßproblemen, wie Digitalvoltmeter, kernphysikalische Spektrometer, automatische Meß- und Prüfsysteme oder radiometrische Dickenmessung.
Nachdem im dritten Kapitel periphere Schaltkreise und im vierten Kapitel Tastaturen, Ziffernanzeigen, A/D- und D/A- Umsetzer sowie Zählsysteme vorgestellt werden, werden im fünften Kapitel Probleme der Meßwertverarbeitung mit Mikrorechnern bis hin zur digitalen Filterung, FFT, Skalierung und Kalibrierung behandelt. Zur Abrundung werden schließlich sowohl anwendungstechnische Probleme wie Anlauf- und Abbruchstrategien im sechsten Kapitel als auch Testmethoden und Fehlerdiagnose im letzten, siebenten Kapitel besprochen.
Die mit aussagekräftigen Bildern bis hin zu Programmen für verschiedene in der Meßtechnik typische Verarbeitungsaufgaben versehenen Darstellungen sind direkt für die praktische Anwendung zugeschnitten.
Das Buch setzt Grundkenntnisse der Rechen- und Meßtechnik voraus. Es spricht besonders die Entwickler elektronischer Meßgeräte an, ist jedoch ebenso für den großen Kreis der Anwender interessant und kann auch Studierenden im Fachstudienabschnitt empfohlen werden.

B 1839 *E.-G. Woschni*

Berechnung von Wärmeübertragern. Von *G. Kanewez.* Berlin: Akademie-Verlag 1982. 328 Seiten, 108 Bilder, 24 Tafeln, 68,— Mark.

Mit diesem Band aus der Reihe „Grundlagen der Verfahrenstechnik" wird ein nahezu universelles Berechnungssystem für Wärmeübertrager vorgelegt. Ausgangspunkt ist eine etwas trockene Klassifikation von fast allen denkbaren Stromführungsvarianten innerhalb eines Apparates und Schaltungsvarianten von Apparaten. Trotzdem sollte der Leser nicht auf die Durcharbeitung dieses ersten Teiles verzichten, weil darin auch einige der sehr interessanten Problemstellungen für die besonders im zweiten von vier Teilen abgeleiteten Berechnungsverfahren erläutert werden. Neben den grundsätzlich bekannten Rechenabläufen für die Auslegung und Nachrechnung von Wärmeübertragern werden auch spezielle praxisrelevante Probleme berücksichtigt. In den Text eingefügte Rechenablaufpläne tragen wesentlich zum Verständnis der überwiegend klar und flüssig geschriebenen Übertragung aus dem Russischen bei.
Dazu gehört auch, daß die vielen aus Buchstaben zusammengestellten Abkürzungen und Indizes mit übersetzt wurden. Lediglich an einigen Stellen möchte man mit dem Übersetzer über die Verwendung von Fachbegriffen diskutieren, z. B. wenn teilweise der Kondensation nicht die Verdampfung, sondern das Sieden gegenübergestellt wird.
An mehreren interessanten Stellen wird auf weiterführende sowjetische Originalliteratur verwiesen, deren Beschaffung in einigen Fällen sehr problematisch sein dürfte.
Insgesamt ist das Buch ein gelungener Beitrag zur Weiterentwicklung der Ingenieurwissenschaft Verfahrenstechnik. Es kann insbesondere Ingenieuren und Wissenschaftlern empfohlen werden, die sich in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen mit der optimalen Auslegung einzelner Wärmeübertrager und mit Systemen von Wärmeübertragern beschäftigen. Darüber hinaus kann es für alle, die auf dem Gebiet der analytischen statischen Modellierung verfahrenstechnischer Prozesse arbeiten, eine interessante Anregung sein.
Einige drucktechnische Unzulänglichkeiten sollten für eine weitere Auflage beseitigt werden.

B 1822 *M. Meigen*

Mikrorechner-Automatisierungssysteme — Anwendungserfahrungen. Herausgegeben von *K. Fleck.* Berlin/Offenbach: VDE-Verlag 1982. 130 Seiten.

Die Automatisierungstechnik hat in den letzten Jahren dank der Einbeziehung

der Mikrorechentechnik wie auch der Bildschirmtechnik die vielleicht umwälzendste Veränderung ihrer bisherigen Geschichte erfahren. Die Entwicklung rechnerorientierter Automatisierungssysteme und Gerätelösungen wurde hierbei im Schrifttum vor allem durch entsprechende Darlegungen der funktionell-technischen Aspekte begleitet.
Hingegen fehlen noch weitgehend umfassenderere Publikationen über die im Umgang mit diesen Systemen gewonnenen Anwendungserfahrungen. Diesem wichtigen Anliegen will sich der vorliegende Band widmen.
Er enthält eine Zusammenstellung von vier Beiträgen, in denen erfreulicherweise nicht nur die Hersteller, sondern auch die Anwender solcher moderner dezentralisierter Automatisierungssysteme zu Wort kommen.
Im ersten Beitrag wird über Betriebserfahrungen beim Einsatz des Systems Teleperm-M in einem Hüttenwerk aus der Sicht des Geräteherstellers berichtet. Ein anderer Produzent macht im zweiten Abschnitt Ausführungen zum System Contronic 3, das in einem konventionellen Kraftwerk eingesetzt ist. Danach werden vom Betreiber einer Chemieanlage Erfahrungen bei der Projektierung und Konfiguration digitaler Automatisierungssysteme mitgeteilt.
Der vierte Beitrag gibt ebenfalls Anwendererfahrungen beim Betrieb von Mikrorechner — Automatisierungssystemen mehrerer Hersteller an unterschiedlichen chemischen Anlagen wieder.
Die genannten Beiträge sind bis auf ein kurzes Vorwort nebeneinander dargestellt. Den größten Raum der Darlegungen nehmen Beschreibungen der automatisierten Anlage und der Automatisierungslösungen ein. Dies ist an sich nicht uninteressant, als hierdurch der Leser Gelegenheit erhält, Einblick in die derzeit noch recht unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten gleichartiger bzw. ähnlicher Aufgaben — insbesondere auf dem Gebiet der Leittechnik — zu nehmen. Zum Hauptanliegen, der Vermittlung der Projektierungs- und Anwendererfahrungen, wird in recht heterogener Form Stellung genommen. Hier hätte der Band sicherlich wesentlich an Aussagekraft gewinnen können, wenn sich den Einzelaussagen eine gewisse Verallgemeinerung und schlußfolgernd daraus die Angabe von Empfehlungen und Richtlinien angeschlossen hätten.

B 1759 *W. Weller*

Entwurf und Untersuchung einer hierarchischen Zwei-Ebenen-Regelung für Industrieroboter. (Fortschritt-Berichte Reihe 8, Nr. 41). Von *J. Rössler*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1981. 136 Seiten, 45 Bilder, 9 Tafeln.

Die Beherrschung von Regelungs- und Steuerungsproblemen an komplexen nichtlinearen Systemen, z.B. Industrierobotern, erfordert meist spezielle Entwurfsverfahren. Besonders die dezentrale Vorgehensweise ermöglicht es, bei Nutzung der natürlichen Strukturierung des Prozesses Teilprobleme zu formulieren, sie parallel zu entwerfen und zu implementieren.
Der Autor behandelt in dieser Arbeit ein derartiges Verfahren in zwei Hierarchieebenen. In einem ersten Abschnitt wird eine Einordnung in bekannte Regelungskonzepte vorgenommen. Danach wird das Verfahren vorgestellt. Es baut auf einer Zerlegung des komplexen Gesamtsystems in gekoppelte Teilsysteme auf. Diese Zerlegung setzt Separierbarkeitseigenschaften der Systemgleichungen voraus, die die möglichen Prozeßklassen einschränken. Auf der Grundlage dieser Zerlegung werden Teilsysteme definiert, die mit Hilfe eines vorgeschlagenen Koordinationsverfahrens suboptimal entkoppelt werden. Die noch bestehenden schwachen Kopplungen werden beim nachfolgenden nichtlinearen Reglerentwurf der Teilsysteme vernachlässigt. Anschließend werden die Probleme der Synchronisation der Teilsysteme sowie Stabilitätsbedingungen behandelt.
Zwei weitere Kapitel widmen sich der Modellierung eines servohydraulischen Industrieroboters sowie der Anwendung und Diskussion des Verfahrens. Die Form der Robotergleichungen kommt den Forderungen des Verfahrens dabei entgegen.
Die Messungen am Objekt zeigen die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. Ähnlich wie bei gleichwertigen zentralen Entwurfsverfahren ist eine hinreichend genaue Modellkenntnis notwendig. Gleichermaßen ist allgemein ein relativ hoher analytischer Rechenaufwand erforderlich, so daß ohne ein Formelmanipulationssystem ein rechnergestützter Entwurf nicht durchgängig möglich ist.
Die Allgemeinheit des Regelungsprinzips läßt die Anwendung auch auf andere Systeme mit ähnlich gelagerter Struktur geeignet erscheinen. Als Vorteil erweist sich bei dem gewählten Prinzip, daß die Ordnung der Teilsysteme relativ niedrig im Vergleich zum Gesamtsystem wird und damit der lokale Entwurfsaufwand sinkt. Gleichzeitig wird damit eine dezentrale Regleranordnung begünstigt, die z. B. durch mehrere Mikrorechner parallele Arbeit ermöglicht. Zu beachten sind die Näherungen bei der Vernachlässigung der Kopplungen nach der Koordination, deren Berechtigung gegebenenfalls am Objekt zu prüfen ist.
Die Darstellung des Inhalts ist mathematisch sauber und für den Ingenieur mit mathematischen Kenntnissen gut verständlich.

B 1766 *G. Meyer*

Optoelektronik, Bauelemente und optische Abbildungsmethoden. Von *D. A. Ross*. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1982. 168 Seiten, 118 Bilder, 5 Tafeln.

Optoelektronische Bauelemente und ihre Eigenschaften sind heute im Zusammenhang mit mehreren sich rasch entwickelnden Anwendungsbereichen interessant geworden. Die Beherrschung ihrer Schaltungstechnik ist ebenso wie die Kenntnis ihrer Eigenschaften und Besonderheiten eine Voraussetzung für die moderne Geräteentwicklung. Das vorliegende Buch (Originaltitel: Optoelectronic Devices and Optical Imaging Techniques, The Macmillan Press 1979) will eine erste Einführung und einen Überblick zu diesen Bauelementen, ihrem Aufbau und ihrem optischelektrischen Verhalten „für Ingenieur- und Physikstudenten in den Anfangssemestern" geben. Nach einer kurzen Darstellung einiger Grundgesetze der Halbleitertechnik werden die Lumineszenzdiode, der Fotowiderstand, die Fotodiode und der Fototransistor beschrieben, ergänzt durch wenige übersichtliche Formeln und viele Bilder, Ersatzschaltungen und Diagramme. Ein längeres Kapitel behandelt das für die meisten Anwendungsgebiete wesentliche Rauschverhalten der Empfängerbauelemente. In zwei weiteren Abschnitten wird die Solarzelle und schließlich der Halbleiterlaser beschrieben, auch hier in vorwiegend verbaler Diskussion seiner wesentlichen Eigenschaften, und demonstriert an einer Vielzahl von Diagrammen und Zeichnungen. Ein Kapitel über optische Abbildungsmethoden — Film, Hologramm, Bildsensoren — schließt das Buch ab. Der auf speziellen Gebieten Arbeitende wird sich an einigen Stellen mehr Details wünschen, so bei der LED ein stärkeres Eingehen auf neuere Konstruktionen und für die Signalübertragung wichtige Parameter, oder Vergleiche verschiedener Empfängerkonzeptionen. Das hieße aber vielleicht, die Zielstellung des Buches als Einführungsliteratur zu überfordern. Zu erwähnen ist die gut lesbare Übersetzung, die nur an wenigen Stellen in allzuwörtlicher Übertragung das englische Original erkennen läßt.

B 1770 *W. Glaser*

Elektronische Halbleiterbauelemente. Bauelemente der Informations- und Leistungselektronik. 4., stark bearbeitete Auflage. Von *A. Möschwitzer*. Berlin: VEB Verlag Technik 1982. 94 Seiten, 116 Bilder, 15 Tafeln, 6,— Mark.
Bestell-Nr. 553 079 3

In der Reihe Informationselektronik ist der Band „Elektronische Halbleiterbauelemente" jetzt in der 4., stark bearbeiteten Auflage erschienen. Er trägt den Untertitel „Bauelemente der Informations- und Leistungselektronik" und beschreibt neben reinen elektronischen Bauelementen auch solche, bei denen wesentliche Parameter durch äußere Größen, wie Temperatur, Magnetfeld, Druck und Lichtstrahlen, gesteuert werden. Der Band gliedert sich in Volumeneffektbauelemente, Sperrschichtbauelemente und oberflächengesteuerte Bauelemente. In knapper Form werden neben den weit verbreiteten Bauelementen auch Gunndioden, Kryotrons, Oberflächenwellenfilter, Solarzellen, Static-Inductions-Transistoren (SIT) und Ladungstransferbauelemente beschrieben. Dabei stehen Funktionsweise, Aufbau und wichtige Kenngrößen im Vordergrund; die Darstellung erfolgt in elementarer Art ohne Ableitung von Formeln, unterstützt durch zahlreiche Schaltskizzen, Schnittbilder, Diagramme und Maßskizzen und ist auf die praktische Anwendung orientiert.
Damit kann die Broschüre auch für Nichtelektroniker sowie im Rahmen der Fachausbildung und Erwachsenenqualifizierung sinnvoll eingesetzt werden. Sie eignet sich darüber hinaus als Wissensspeicher und zur Gewinnung eines schnellen Überblicks. Mit 56 Literaturstellen, auf die im Text Bezug genommen ist, wird dem Leser der Einstieg in spezielle Teilgebiete erleichtert.

B 1816 *H. Gottschalk*

10. Internationale Konferenz des TC 3 der IMEKO

Unter dem Motto „Fortschritte in Wägetechnologie und Kraftmessung" führt das TC 3 „Kraft- und Massemessung" der IMEKO vom 11. bis 14. September 1984 in Kobe/Japan die o. g. Konferenz durch.
Fachexperten werden zu folgenden Schwerpunkten berichten:

- Moderne Wägemethoden in der Industrie
- Moderne Bauteile, Geräte und Systeme für Wägung und Kraftmessung
- Praktische Anwendungen in Industrie, Transport, Handel, Materialprüfung, Landwirtschaft, Medizin usw.
- Standardisierung; metrologische und theoretische Aspekte von Wägung und Kraftmessung
- Ökonomische Aspekte.

III. Seminar über Industrieroboter

Vom 6. bis 8. Juni 1984 veranstalten die Fachsektionen Automatisierung, Werkzeugmaschinen und Fertigungsentwicklung und die Gebietsorganisation Györ/Ungarische VR der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Maschinenbau, die Wissenschaftliche Gesellschaft für Meßtechnik und Automatisierung und die Fachausschüsse der Ungarischen Handelskammer in Györ das o. g. Seminar.
Vorträge zu folgenden Themenkreisen werden gehalten:

- Roboterentwurf
- Robotersteuerung
- Teile und Baueinheiten modular aufgebauter Roboter
- Anwendung von Robotern und Robotersystemen

Auskünfte erteilt:

Wissenschaftliche Gesellschaft für Maschinenbau der Ungarischen VR, Budapest, V., Kossuth Lajos tér 6—8, Telefon 324—767.

Tagung „Meßstochastik"

Zu Ehren des 75. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. *F.-H. Lange* veranstaltet der Wissenschaftsbereich Informationstechnik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock am 22. und 23. November 1984 die o. g. Tagung. Inhaltliche Schwerpunkte des Tagungsprogramms sind:

- Meßtechnische Verfahren zur Analyse stochastischer Prozesse (Prozeßidentifikation)
- Mikrorechneranwendungen (Hard- und Softwareprobleme, Lösungen und Ergebnisse).

Vorgesehen sind Vorträge von 20 min Dauer. Vortragsangebote (druckreifer Vortragstext und Abbildungen einschl. Publikationsgenehmigung bis 28. Februar 1984) und Anmeldungen sind zu richten an: Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Technische Elektronik, WB Informationstechnik, 2500 Rostock, Albert-Einstein-Str. 2.

10. Wissenschaftliche Konferenz der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden

Vom 10. bis 12. Juli 1984 veranstaltet die Sektion Elektrotechnik der TU Dresden in Verbindung mit dem Bezirksvorstand Dresden der KDT mit internationaler Beteiligung die o. g. Konferenz. Sie steht im Zeichen des 125. Geburtstages von *Johannes Görges*. Fachlich verfolgt sie das Ziel, über neueste Forschungsergebnisse der Sektion zu informieren und darüber zu diskutieren. Im Vordergrund stehen dabei die Anwendung der Mikroelektronik bei Energieumwandlung und -übertragung, bei Entwicklung neuer effektiver Technologien sowie in der Meßtechnik.
Nach Plenarvorträgen zu Tendenzen der Elektrotechnik, Automatisierungstechnik und Werkstoffwissenschaft sollen folgende Themengruppen diskutiert werden:

- Steuerung der Energieumwandlung
- Betriebsvorgänge in Elektroenergienetzen
- Hochspannungstechnik und -geräte
- Elektrische Maschinen.

Weiterhin finden eine Poster-Session zu Forschungsergebnissen junger Wissenschaftler und Studenten sowie Rundtischgespräche statt.
Interessenten wenden sich bitte an: KDT-Bezirksvorstand Dresden, Sekretariatsbereich Wissenschaft und Technik, 8020 Dresden, Basteistraße 5.

Supraleitender „Transistor" — Schaltelement nach neuem Prinzip

Ein supraleitendes elektronisches Schalt- und Verstärkerelement, das auf neuartigen Prinzipien basiert, ist von Mitarbeitern des IBM-Forschungszentrums entwickelt worden. Das Element ähnelt in seiner Wirkung einem konventionellen Transistor: es verstärkt, invertiert, und schaltet einkommende Signale, benötigt aber dazu sehr viel weniger Energie. Das Schaltelement erhielt die Bezeichnung "Quiteron" (quasiparticle injection tunneling effect) und basiert, wie die schon seit einiger Zeit bekannten Josephson-Kontakte, auf dem quantenphysikalischen Tunneleffekt. Es muß bei der Temperatur des flüssigen Heliums betrieben werden. Im Gegensatz zum Josephson-Element arbeitet das Quiteron jedoch unter Nutzung eines nichtlinearen, fern vom Gleichgewicht arbeitenden Supraleiteffektes.
Die Schaltgeschwindigkeit liegt bei 300 ps, der Leistungsbedarf beträgt nur etwa ein Hundertstel der schnellsten heutigen Halbleiterschaltelemente. Quiterons sollen gegenüber externen Magnetfeldern unempfindlich sein. Mit heute gängigen Verfahren können sie auf den Dimensionsbereich von 0,1 μm miniaturisiert werden, was einen sehr hohen Integrationsgrad ermöglicht.

(ADN-WT 1572-11b)

Optoelektronische Kfz-Anzeigegeräte

Eine neue Generation optoelektronischer Kfz-Anzeigegeräte mit LED-Anzeigen, die u. a. den augenblicklichen Kraftstoffverbrauch überschaubar darstellen, entstand im Meßgerätewerk Beierfeld des Kombinats VEB EAW „Friedrich Ebert" Berlin-Treptow. Die Anzeiger helfen dem Kraftfahrer, ökonomisch und dennoch zügig zu fahren, mäßig zu beschleunigen und rechtzeitig zu schalten. Nach internationalen Vergleichen kann dies zu einer Kraftstoffeinsparung bis zu 10% führen. Zum Sortiment des Betriebes gehören folgende Geräte:

- Kfz-Anzeigegerät mit komplexer optoelektronischer LED-Anzeige (Kraftstoffmomentanverbrauch, Motortemperatur, Kraftstoffvorrat)
- Kombigerät (Motortemperatur, Kraftstoffverbrauch)
- Kfz-Anzeigegerät zur Nachrüstung (Kraftstoffmomentanverbrauch)
- Kfz-Anzeigegerät für elektronische Motordrehzahlmessung.

(ADN-WT 1582-4a)

Simulator für technologische Prozesse

Ein Simulator, an dem die Steuerung der technologischen Prozesse eines Chemiebetriebes erlernt werden kann, ist im Versuchs- und Konstruktionsbüro für Automatik in Jerewan/UdSSR entwickelt worden. Gefahrlos für den künftigen Operateur werden bei der Arbeit auftretende mögliche unvorhersehbare Situationen oder Havariefälle mit Hilfe mathematischer Modelle imitiert.
Die Fähigkeiten des Lernenden werden von einem Rechner „beurteilt". Der erste Simulator dieser Art für die chemische Industrie der UdSSR wurde im Ausbildungszentrum der Produktionsvereinigung AMMOFOS Čerepowec aufgestellt.

(ADN-WT 1588-27b)

KURZFASSUNGEN

Döschner, Ch.; Schulz, H.:

Optimierung der Verbrennungsluftzufuhr braunkohlengefeuerter Dampferzeuger über die Kreuzkorrelationsmethode

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 52–54

Erläutert wird ein Verfahren der Verbrennungsluftsteuerung braunkohlengefeuerter Dampferzeuger zur Wirkungsmaximierung. Der mikrorechnerorientierte Algorithmus verwendet eine Variante der Frequenzgangmessung durch Kreuzkorrelation. Nach genauerer Vorstellung werden Simulationsstudien zur Effektivitätsanalyse des Verfahrens und zur Anpassung variabler Parameter vorgestellt.

Kollar, L.:

Zur Lenkung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate und mathematische Modelle gelenkter Systeme

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 57–60

Der Entwurf optimaler Regelalgorithmen setzt Kenntnisse über das Verhalten der Regelstrecke unter Betriebsbedingungen oder betriebsähnlichen Bedingungen voraus. Die Beschreibung des Lenkvorganges mobiler landwirtschaftlicher Aggregate wird gegenwärtig noch durch unzureichende theoretische Kenntnisse über die Wechselwirkungen Reifen — nachgiebiger Boden erschwert. Deshalb werden aus experimentell bestimmbaren Reifenkennlinienfeldern und Konstruktions- sowie Betriebsdaten der zu lenkenden Aggregate das mathematische Modell der Regelstrecke mobiles Aggregat — nachgiebige Fahrbahn und die den Lenkvorgang beschreibenden Übertragungsfunktionen ermittelt.

Schmidt, G.; Lappus, G.:

Verfahren der Echtzeitsimulation, Netzzustandsbeobachtung und prädiktiven Steuerung bei der Prozeßführung von Erdgasverteilungsnetzen

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 60–64

Durch Einsatz moderner Verfahren der Prozeßautomatisierung lassen sich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit komplexer Gasverteilungsprozesse erhöhen. Von der Struktur und den Aufgaben eines fortgeschrittenen Prozeßführungssystems ausgehend wird über zum Teil bereits industriell genutzte, speziell für große Gasverteilungsnetze neu entwickelte Prozeßführungshilfen berichtet, wobei insbesondere auf verschiedene Formen der Prozeßsimulation, eine dynamische Netzzustandsschätzung und eine prädiktive Netzsteuerung eingegangen wird.

Petrov, P.; Djambasov, K.:

Multimikrorechnersystem als Universalsteuerungsanlage

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 64–65

Auf der Grundlage moderner mikroelektronischer Bauelemente wird ein Multimikrorechnersystem vorgestellt, das als Universalsteuerungsanlage nutzbar ist. Der Aufbau als Multimikrorechnersystem mit einer Struktur-Hierarchie ermöglicht eine hohe Paralleldatenverarbeitung durch die Dezentralisation der Systemfunktionen in relativ selbständigen Subsystemen und die flexible Anwendung der zentralisierten oder dezentralisierten Steuerung durch die Wahl einer stärkeren oder schwächeren Kopplung innerhalb des hierarchischen Systems. Durch die modulare Gestaltung sowohl der Hardware als auch der Software wird eine sehr gute Anpassung an die im einzelnen Anwendungsfall geforderten Funktionen erreicht.

Fritzsch, W.:

Aspekte der Steuerungstechnik in der automatisierten bedienarmen Produktion

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 66–69

Ausgehend von den Zielstellungen beim Betrieb fertigungstechnischer Prozesse werden Ansatzpunkte für Automatisierungsmaßnahmen abgeleitet. Es wird ein Modellierungsansatz vorgestellt, der den Anschluß an bekannte Theorien hierarchischer Systeme ermöglicht. Die technische Realisierung erfolgt vorwiegend mit Anlagensystemen in Baumstruktur. Aus Sicht der Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz erscheinen verteilte Systeme auch für bedienarme, flexible Fertigungen günstiger. Hierzu wird ein kurzer Überblick gegeben.

Weller, W.:

Lernfähige Mikrorechnersteuerungen für Industrieroboter

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 70–72

Zur Verbesserung von Leistungen der künstlichen Intelligenz künftiger Robotergenerationen werden zwei entwickelte Konzepte für lernfähige Steuerungen kurz vorgestellt, bei denen das Lernen mit oder ohne äußere Belehrung Anwendung findet. Anhand der Beispiele eines trainierbaren Schweißroboters und eines selbstlernenden mobilen Roboters werden mögliche Anwendungen demonstriert.

Kopacek, P.:

Dynamisches Verhalten von pneumatisch angetriebenen Handhabungsgeräten

msr, Berlin 27 (1984) 2, S. 72–73

Ein aus der Literatur bekanntes exaktes Modell eines elektro-hydraulischen Antriebes für ein Handhabungsgerät wird für einen elektropneumatischen Antrieb adaptiert. Da das sich ergebende Modell 6. Ordnung hoch nichtlinear ist und eine Vereinfachung aufgrund physikalischer Beziehungen ebenfalls auf ein zu kompliziertes Modell führt, wurde heuristisch ein lineares Modell 2. Ordnung erstellt, dessen Parameter allerdings mittels Simulation zu bestimmen sind.

РЕЗЮМЕ

Döschner, Ch.; Schulz, H.:

Оптимизация подачи воздуха, необходимого для горения, парогенераторов с буроугольной топкой при помощи метода взаимной корреляции

msr, Berlin 27 (1894) 2, стр. 52–54

Пояснен метод управления воздухом, необходимым для горения, парогенераторов с буроугольной топкой для максимизации действия. Ориентированный на микровычислитель алгоритм использует вариант измерения частотной характеристики при помощи взаимной корреляции. После подробного представления показаны студии моделирования для анализа эффективности метода и для подгонки переменных параметров.

Kollar, L.:

Об управлении передвижными сельскохозяйственными агрегатами и о математических моделях управляемых систем

msr, Berlin 27 (1984) 2, стр. 57–60

Разработка оптимальных алгоритмов регулирования требует знаний о поведении объекта регулирования в условиях эксплуатации или в условиях, подобных эксплуатации. Описание процесса управления передвижными сельскохозяйственными агрегатами, в настоящее время, еще осложняется наличием недостаточных теоретических знаний о взаимных действиях между шинами и упругой почвой. Поэтому, в нижеследующем на основе экспериментально определяемых полей характеристик шин и конструктивных, а также эксплуатационных данных управляемых агрегатов определены математическая модель объекта регулирования передвижного агрегата — упругой мостовой и функции передачи, описывающие процесс управления.

Schmidt, G.; Lappus, G.:

Метод моделирования в истинном масштабе времени, наблюдение состояния сети и предиктивное управление при управлении процессом сетей распределения природного газа

msr, Berlin 27 (1984) 2, стр. 60–64

Путем применения современных способов автоматизации процессов возможно повышение безопасности и рентабельности комплексных процессов распределения газа. Исходя из структуры и задач прогрессивной системы управления процессом доложено о пособиях управления процессом, которые частично уже используются в промышленности и ново разработаны специально для больших сетей распределения газа, причем остановлено в частности на различных формах моделирования процесса, на динамической оценке состояния сети и предиктивном управлении сетью.

Petrov, P.; Djambasov, K.:

Мультимикровычислительная система как универсальная управляющая установка

msr, Berlin 27 (1984) 2, стр. 64–65

На основе современных микроэлектронных элементов представлена мультимикровычислительная система, используемая как универсальная установка управления. Построение как мультимикровычислительная система со структурной иерархией делает возможной высокую обработку параллельных данных путем децентрализации системных функций в относительно самостоятельных подсистемах и обеспечивает гибкое применение централизованного или децентрализованного управления путем выбора более сильной или слабой связи внутри иерархической системы. Модульным формлением как аппаратурного, так и алгоритмического обеспечения, достигается очень хорошее согласование с требуемыми в отдельном случае применения функциями.

Fritzsch, W.:

Аспекты техники управления в автоматизированном производстве с малым обслуживанием

msr, Berlin 27 (1984) 2, стр. 66–69

Исходя из целеустановок при эксплуатации технологии изготовления процессов выведены исходные идеи для мероприятий автоматизации. Представлен подход моделирования, осуществляющий связь с известными теориями иерархических систем. Техническая реализация происходит преимущественно при помощи систем установок радиальной структуры. Из вида надежности и допуска распределенные системы считаются более выгодными также и для гибкого изготовления с малым обслуживанием. По этому поводу дан краткий обзор.

Weller, W.:

Обучаемые микровычислительные управления для промышленных роботов

msr, Berlin 27 (1984) 2, стр. 70–72

Для улучшения производительностей искусственного интеллекта будущих поколений роботов вкратце представлены два разработанных концепта обучаемых управлений, у которых применяется изучение с обучением и без него. На примерах тренируемого сварочного робота и самообучаемого передвижного робота продемонстрированы возможные случаи применения.

Kopacek, P.:

Одинамическом поведении манипуляторов с пневматическим приводом

msr, Berlin 27 (1984) 2, стр. 72–73

Известный из литературы точный модель электрогидравлического привода для манипулятора будет адаптирован для электропневматического привода. В связи с тем, что получаемый модель шестого порядка высоко нелинейный, а упрощение на основе физических отношений приводит также к слишком сложной модели, евристическим образом была разработана линейная модель второго порядка, параметры которой однако должны определяться путем моделирования.

SUMMARIES

Döschner, Ch.; Schulz, H.:

Optimization of the Combustion Air Feed of Lignite Firing Steam Generators by Means of the Cross Correlation Method

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 52–54

The authors deal with a method of the combustion air control of lignite firing steam generators with regard to the efficiency maximization. The microcomputer-oriented algorithm uses a variant of the frequency response measurement by cross correlation. After having treated it in detail they present simulation studies for the efficacy analysis of the method and for the fitting of variable parameters.

Kollar, L.:

On Guiding Mobile Agricultural Aggregates and Mathematical Models of Guided Systems

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 57–60

The design of optimal feedback control algorithms assumes knowledge on the plant behavior under operational conditions or conditions similar to the real operation. The description of the guiding process of mobile agricultural aggregates is actually rendered difficult by the unsufficient theoretical knowledge on the mutual action between tyre and yielding ground. Therefore in the following the author determines the mathematical model of the plant mobile aggregate — yielding ground as well as the transfer functions describing the guiding process from experimentally determinable tyre characteristics and construction and operation data of the aggregates to be guided.

Schmidt, G.; Lappus, G.:

Real-Time Simulation Methods, Network State Observation and Predictive Control with the Process Guidance of Mineral Gas Distribution Nets

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 60–64

The use of modern process automation methods allows to increase the safety and economy of complex gas distribution processes. Starting from the structure and the problems of a progressive process guidance system the authors report on process control aids new developed especially for large gas distribution nets and in part used industrially, in particular treating different forms of process simulation, a dynamic network state estimation and a predictive net control.

Petrov, P.; Djambasov, K.:

Multi-Microcomputer System as Universal Control Equipment

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 64–65

On the base of modern micro-electronic components the authors present multi-microcomputer system which can be used as universal control equipment. The design as a multi-microcomputer system with a hierarchical structure allows a high parallel data processing by the decentralization of the system functions in relatively autonomus subsystems as well as a flexible application of the centralized or decentralized control by the choice of a higher or lower coupling within the hierarchical system. Due to the modular realization of both hardware and software a very good fitting to the functions required in the individual case of application is obtained.

Fritzsch, W.:

Aspects of Control Engineering in the Automated Operator-Reduced Production

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 66–69

Starting from the objects with the operation of manufacturing processes the author derives fundamentals for automation measures. He presents a modeling approach allowing the connexion to known theories of hierarchical systems. The technical realization is based above all on systems with tree structure. From the point of view of the reliability and error tolerance distributed systems seem to be more favourable for the operator-reduced flexible manufacturing, too. For this a short survey is given.

Weller, W.:

Learning Microcomputer Controls for Industrial Robots

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 70–72

For improving the performance of the artificial intelligence of future robot generations the author briefly presents two conceptions for learning controls with which the learning is applied with or without external instruction. By means of the examples of a trainable welding robot and a self-learning mobile robot possible applications are demonstrated.

Kopacek, P.:

Dynamic Behavior of Pneumatically Driven Manipulation Devices

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 72–73

An exact model known from the literature of an electro-hydraulic drive for a manipulating device is fitted to an electro-pneumatic drive. Since the resulting 6th-order model is highly nonlinear and a simplification on the base of the physical relations also leads to a model too complicated a linear second-order model was heuristically established the parameters of which, however, are to be determined by means of simulation.

RÉSUMÉS

Döschner, Ch.; Schulz, H.:

L'optimisation par la méthode de corrélation mutuelle de l'amenée de l'air de combustion pour des générateurs de vapeur au lignite

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 52–54

Les auteurs traitent une méthode de la commande de l'air de combustion de générateurs de vapeur à chauffage au lignite en vue de la maximisation d'efficacité. L'algorithme orienté sur micro-ordinateur utilise une variante de la mesure de réponse fréquentielle par corrélation mutuelle. Après ayant l'expliquée en détail, ils présentent des études de simulation pour l'analyse d'effet de la méthode et pour l'adaptation de paramètres variables.

Kollar, L.:

Sur la conduite d'agrégats agricoles mobiles et des modèles mathématiques de systèmes dirigés

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 57–60

La conception d'algorithmes de réglage optimaux présuppose le savoir sur le comportement de l'objet à asservir sous conditions opératoires ou conditions similaires à l'opération réelle. La description du processus de direction d'agrégats agricoles mobiles est encore rendue plus difficile par le savoir théorique insuffisant quant aux actions mutuelles pneu — sol souple. C'est pourquoi, dans le suivant, l'auteur détermine le moèdle mathématique de l'objet à asservir agrégat mobile — sol souple à partir de caractéristiques et de données de construction et d'exploitation des agrégats à diriger.

Schmidt, G.; Lappus, G.:

Des méthodes de la simulation en temps réel, de l'observation d'état de réseau et de la commande prédictrice dans la gestion de réseaux de distribution de gaz

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 60–64

L'emploi de méthodes modernes de l'automatisation de processus permet d'augmenter la sûreté et l'économie de processus de distribution de gaz complexes. A partir de la structure et des problèmes d'un système progressiste de gestion de processus, les auteurs traitent des aides de gestion de processus nouvellement développées spécialement pour de grands réseaux de distribution de gaz et en partie dé jà utilisées dans l'industrie, particulièrement tenant compte de différentes formes de la simulation de processus, d'une estimation dynamique d'état de réseau d'une commande prédictrice de réseau.

Petrov, P.; Djambasov, K.:

Un système à multi-microcalculator comme dispositif de commande universel

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 64–65

Sur la base de composants micro-électroniques modernes, les auteurs présentent un système multi-microcalculateurs qui peut être utilisé comme un dispositif de commande universel. La construction comme un système multi-microcalculateurs avec une structure hiérarchique permet un haut traitement parallèle des données par la décentralisation des fonctions de système dans des sous-systèmes relativement autonomes ainsi qu'un emploi flexible de la commande centralisée ou décentralisée par le choix d'un couplage plus haut ou plus faible au dedans du système hiérarchique. Par la construction modulaire du matériel et du logiciel, on obtient une adaptation très bonne aux fonctions exigées dans l'individuel cas d'emploi.

Fritzsch, W.:

Des aspects de la technique de commande dans la production automatisée réduite en personnel

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 66–69

A partir des buts dans l'opération de processus de fabrication, l'auteur dérive des fondements pour des mesures d'automation. Il présente une approche de modélisation qui permet une connexion à des théories connues des systèmes hiérarchiques. La réalisation technique est basée, surtout, sur des systèmes en, structured 'arbre. D'un point de vue de la fiabilité et de la tolérance d'erreurs des systèmes distribués semblent plus favorable aussi pour les fabrications flexibles réduites en personnel. Pour cela, un court aperçu est donné.

Weller, W.:

Des commandes à apprentissage réalisées par micro-ordinateur pour des robots industriels

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 70–72

Pour améliorer la performance de l'intelligence artificielle des futures générations de robots, l'auteur présente brièvement deux conceptions pour des commandes à apprentissage près lesquelles l'apprentissage est appliqué avec ou sans enseignement externe. A l'aide des examples d'un robot de soudage entraînable et d'un robot mobile à auto-apprentissage, de possibles applications sont démontrées.

Kopacek, P.:

Le comportement dynamique de dispositifs de manipulation entraînés pneumatiquement

msr, Berlin 27 (1984) 2, pp. 72–73

Un modèle exact connu dans la littérature d'un entraînement électro-hydraulique pour un dispositif de manipulation est adapté à un entraînement électro-pneumatique. Parce que le modèle résultant du sixième ordre est hautement non linéaire et une simplification sur la base de relations physiques aussi conduit à un modèle trop compliqué on a établi heuristiquement un modèle linéaire du deuxième ordre dont les paramètres, cependant, doivent être déterminés à l'aide de la simulation.

Bestellschein

Technik-Literatur

Die aufgeführten Bücher können Sie mit diesem Bestellschein im Fachbuchhandel bestellen.

Expl.

Flurförderzeuge
Technische Beschreibung, Wartung und Reparatur von bulgarischen Flurförderzeugen
Von *E. D. Michajlov, St. B. Stojanov* und *N. A. Tolev*
1. Auflage, etwa 260 Seiten, 231 Bilder, 42 Tafeln
Pappband 27,— M
Bestell-Nr.: 5530427 ....

Mikroprozessortechnik
Aufbau und Anwendung des Mikroprozessorsystems U 880
Von *H. Kieser* und *M. Meder*
2., durchgesehene Auflage, 352 Seiten, 157 Bilder, 64 Tafeln
Leinen 36,— M (Ausland 48,— M)
Bestell-Nr.: 5530945 ....

Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik
Von *K. Göldner* und *St. Kubik*
2., stark bearbeitete Auflage, 272 Seiten, 232 Bilder, 1 Tafel
Leinen 18,50 M (Ausland 26,— M)
Bestell-Nr.: 5531921 ....

Prinziplösungen zur Luftreinhaltung und Abprodukterfassung
Von *E. Stief*
1. Auflage, 204 Seiten, 71 Bilder, 43 Tafeln
Pappband 20,— M
Bestell-Nr.: 5530531 ....

Darüber hinaus können Sie alle in diesem Heft angezeigten und rezensierten Bücher des VEB Verlag Technik mit diesem Vordruck bestellen.

Expl.

....

....

....

....

....
Name, Vorname

....
Anschrift mit Postleitzahl

....
Datum Unterschrift



messen · steuern · regeln

Herausgeber	Kammer der Technik, Wissenschaftliche Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 tech dd
Verlagsdirektor	Dipl.-oec. *Herbert Sandig*
Redaktion	Dr.-Ing. *Dietrich Werner*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870362) Dipl.-Ing. *Dieter Herrmann*, Redakteur (Telefon: 2870374)
Lizenz-Nr.	1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
AN (EDV)	15936
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Gesamtherstellung	VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 5820 Bad Langensalza
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, 1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201. Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, DDR-1157 Berlin, Hermann-Duncker-Str. 89
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in andere Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
Bezugsmöglichkeiten	
DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88, Beijing
ČSSR	PNS — Ústředni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Vinohradská 41, 12505 Praha PNS, Ústred na Expedicia Tlače, Gottwaldovo nám. 48, 88419 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C.K.P. i W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	Directia Generala a Postei și Difuzarii Presei, Palatul Administrativ, București
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P.K.H.I., Külföldi Előfizetési Osztály, P.O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141—167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160, und Leipzig Book Service, DDR-7010 Leipzig, Talstraße 29.

Annahmebedingungen

Die Redaktion veröffentlicht nur solche Beiträge, die noch an keiner anderen Stelle des In- und Auslandes in dieser Form erschienen sind oder bis zur Veröffentlichung erscheinen werden und die die Verfasser bis zum Ablauf des ersten, dem Erscheinen folgenden vollen Kalenderjahres an keiner anderen Stelle veröffentlichen, ohne hierzu vorher die Zustimmung der Redaktion der Zeitschrift eingeholt zu haben. Mit der Annahme und Veröffentlichung des Manuskriptes geht das ausschließliche Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder auf den Verlag über. Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Redaktion nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme u. a. von Heften der Zeitschrift, einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen. Ferner behält sich die Redaktion Änderungsvorschläge nach der Durcharbeitung der Beiträge vor. Beiträge müssen eine Kopie der Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes bzw. des Instituts enthalten.
Richtlinien für die Manuskriptgestaltung sind dem Heft 1 (Beilage) messen · steuern · regeln 1984 zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung dieser Gesichtspunkte garantiert eine sofortige Bearbeitung und verzögerungsfreie Veröffentlichung der Arbeit in der Zeitschrift.



Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst "Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] *Briedis, V. A.:* Avtomatizirovannaja obrabotka informacii v meliorativnom stroitel'stve (Automatisierte Informationsverarbeitung im Meliorationsbauwesen). finansy i statistika. 1. Quart. 1984. NK 83–32 (17).

[2] *Vasil'ev, A. F.; Pučinskas, K. K.:* Avtomatizirovannaja obrabotka učetnoj informacii v sel'skochozjajstvennych predprijatijach (Automatisierte Verarbeitung der Abrechnungsinformation in landwirtschaftlichen Betrieben). Finansy i statistika. 4. Quart. 1984. NK 83–32 (22).

[3] *Kovalev, V. I.; Rachmanova, Ju. N.:* Avtomatizirovannaja obrabotka informacii v Gosbanke SSSR (Automatisierte Informationsverarbeitung in der Staatsbank der UdSSR). Finansy i statistika. NK 83–32 (28). 1. Quart. 1984.

[4] *Pankov, V. V.:* Avtomatizirovannyj učet na predprijatijach po postavkam produkcii (Automatisierte Abrechnung in Betrieben nach der Produktionslieferung). Finansy i statistika. 4. Quart. 1984. NK 83–32 (42).

[5] *Rapoport, M. M.:* Učet i otčetnost' v ASU-sel'choz (Abrechnung und Abrechenbarkeit in ASU landwirtschaftlicher Betriebe). Finansy i statistika. 2. Quart. 1984. NK 83–32 (45).

[6] *Džessen, R.:* Metody statističeskich obsledovanij (Methoden der statistischen Beobachtungen. Übers. aus dem Engl.). Finansy i statistika. 2. Quart. 1984. NK 83–32 (57).

[7] *Zatolokin, V. M.:* Metody analiza kačestva produkcii (Methoden der Analyse der Produktionsqualität). Finansy i statistika. 4. Quart. 2984. NK 83–32 (59).

[8] *Tichomirov, N. P.:* Staitističeskie metody analiza vosproizvodstva naselenija (Statistische Methoden der Analyse der Reproduktion der Bevölkerung). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (71).

[9] *Kotjukov, V. I.:* Mnogofaktornye kusočnolinejnye modeli (Stückweise lineare Modelle mit mehreren Faktoren). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (98).

[10] Metody analiza dannych (Methoden der Datenanalyse. Übers. aus dem Franz.) Finansy i statistika. 2. Quart. 1984. NK 83–32 (99).

[11] *Posaran, M.; Slejter, L.:* Dinamičeskaja regressija (Dynamische Regression. Übers. aus dem Engl.). Finansy i statistika. 2. Quart. 1984. NK 83–32 (100).

[12] *Dem'janenko, V. Ju.:* Sredstva proetirovščika bol'šich baz dannych (Mittel des Projektanten großen Datenbasen). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (107).

[13] *Litvin, V. G.; Aladyšev, V. P.; Viničenko, A. I.:* Analiz proizvoditel'nosti mul'tiprogrammnych EVM (Analyse der Produktivität von Multiprogramm-EDVA). Finansy i statistika. 2. Quart. 1984. NK 83–32 (111).

[14] *Lorin, G.; Dejtel, Ch.:* Operacionnye sistemy (Operationssysteme. Übers. aus dem Engl.). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (112).

[15] Mikro-EVM SM-1800 (Mikrorechner SM-1800). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (113).

[16] Novye sredstva programmirovanija dlja ES EVM (Neue Mittel zur Programmierung für ES Rechner). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (114).

[17] *Pajl, Ja.:* ADA — jazyk vstroennych sistem (ADA — die Sprache der eingestellten Systeme. Übers. aus dem Engl.). Finansy i statistika. 4. Quart. 1984. NK 83–32 (116).

[18] Sistemy upravlenija bazami dannych dlja ES EVM (Steuerungssysteme für Datenbasen für EDVA vom Typ ESER). Finansy i statistika. 4. Quart. 1984. NK 38–32 (119).

[19] *Ueldon, Dž.-L.:* Administracija baz dannych (Administration von Datenbasen. Übers. aus dem Engl.). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (120).

[20] *Chanter, R.:* Proektirovanie i konstruirovanie kompiljatorov (Projektierung und Konstruktion von Kompilatoren). Finansy i statistika. 1. Quart. 1984. NK 83–32 (121).

[21] EVM pjatogo pokolenija (EDVA der fünften Generation. Übers. aus dem Engl.). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (123).

[22] *Jakubajtis, E. A.:* Informacionno-vyčislitel'nye seti (Informations-Rechnernetze). Finansy i statistika. 1. Quart. 1984. NK 83–32 (124).

[23] Vyčislitel'nye sistemy. Vyp. 5 (Rechnersysteme. Ausg. 5). Finansy i statistika. 3. Quart. 1984. NK 83–32 (148).

[24] *Korolev, M. A.; Mišenin, A. I.; Chotjašov, E. N.:* Teorija ekonomičeskich informacionnych sistem (Theorie ökonomischer Informationssysteme). Finansy i statistika. 2. Quart. 1984. NK 83–32 (266).

[25] *Tichonov, V. Ja.:* Elementy i sistemy elektroavtomatiki v piščevoj promyšlennosti (Elemente und Systeme der Elektroautomatik in der Lebensmittelindustrie). Legkaja i piščevaja prom-st'. 1. Quart. 1984. NK 83–32 (282).

[26] *Darachovskij, I. S.:* Organizacija upravlenija promyšlennym proizvodstvom (voprosy metodologii i praktiki) (Organisation der Steuerung in der Industrieproduktion (Fragen der Methodologie und Praxis)). Štiinca (Mold SSR). 3. Quart. 1984. NK 83–33 (29).

[27] Matematičeskoe obespečenie ASU (Software für ASU). Štiinca (MoldSSR). 1. Quart. 1984. NK 83–33 (31).

[28] *Anisimov, P. A.; Marižuk, M. N.:* Sistemy operativnogo upravlenija diskretnymi proizvodstvami (Systeme der operativen Steuerung der diskreten Produktion). Štiinca (MoldSSR). 3. Quart. 1984. NK 83–33 (76).

[29] *Trapeznikov, V. A.:* Upravlenie i naučnotechničeskij progress (Steuerung und wissenschaftlich-technischer Fortschritt). Nauka. 3. Quart. 1983. NK 83 -33 (78).

[30] Dinamičeskie javlenija v neuporjadočennych sistemach (Dynamische Erscheinungen in ungeordneten Systemen). Štiinca (MoldSSR). 3. Quart. 1984. NK 83–33 (86).

[31] *Dolgov, Ju. A.; Borščevič, V. I.; Sorokin, G F.:* Informacionnyj podchod k modelirovan iju technologičeskich processov (Informationelles Herangehen an die Modellierung technologischer Prozesse). Stiinca (MoldSSR). 2. Quart. 1984. NK 83–33 (123).

[32] Optimizacija parametrov elektrotechničeskich ustrojstv (Optimierung der Parameter elektrotechnischer Anlagen). Štiinca (MoldSSR). 1. Quart. 1984. NK 83 –33 (125).

[33] Elektroperedači s reguliruemymi parametrami (Elektroübertragung mit regelbaren Parametern). Štiinca (MoldSSR). 2. Quart. 1984. NK 83–33 (126).

[34] *Kodrjanu, I. G.:* EVM i matematika (gnoselogičeskij aspekt) (EDVA und Mathematik (erkenntnistheoretischer Aspekt)). Štiinca (MoldSSR). 4. Quart. 1984. NK 83–33 (138).

[35] Matematičeskie issledovanija Vyp. 78: Matematičeskoe modelirovanie processov v ekonomike (Mathematische Forschungen, Ausg. 78: Mathematische Modellierung ökonomischer Prozesse). Štiinca (MoldSSR). 2. Quart. 1984. NK 83–33 (187).

msr 8002

ISSN 0026-0347, mess., steuern, regeln
Berlin 27 (1984) 2, S. 49—96